

**GÊNESE E DEGRADAÇÃO DE DURIPÃS EM UMA  
TOPOSSEQUÊNCIA DOS TABULEIROS COSTEIROS,  
CONDE – BA**

**RICARDO ESPÍNDOLA ROMERO**

Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. **CELSO AUGUSTO CLEMENTE**

Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura  
“Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, para  
obtenção do título de Doutor em Agronomia, Área de  
Concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

**PIRACICABA**  
Estado de São Paulo – Brasil  
Abril – 2003

Aos meus pais, Sebastião e Anazira,  
que prosseguiram me apoiando;

OFEREÇO

À minha esposa, Solange, que com seu constante  
incentivo e apoio foi fundamental para  
o desenvolvimento deste trabalho;

Aos meus descendentes, Thaís e Ricardo Filho,  
que são motivos de alegria e de força  
para avançarmos nas atividades,

DEDICO.

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal do Ceará, pela liberação concedida para participação no curso;

Ao professor Celso Augusto Clemente, pela orientação e sugestões;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES-PICDT), pela concessão da bolsa de estudo;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa;

Aos professores Lucedino, Célia, Melfi, Bertoldo e Álvaro, pelas críticas e sugestões;

Aos funcionários Sérgio, Bete, Luciano e Flávia, pelo apoio nas atividades desenvolvidas;

Aos colegas Herdjânia, Márcio, Cláudia, Tiago, Vânia e Tairone, pelo auxílio e amizade;

A todos que de algum modo contribuíram para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

	Página
RESUMO	vii
SUMMARY	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 Formação Barreiras.....	3
2.2 Solos dos Tabuleiros Costeiros.....	5
2.2.1 Características gerais.....	5
2.2.2 Mineralogia.....	7
2.2.2.1 Caulinita.....	8
2.2.2.2 Óxidos de Ferro.....	9
2.3 Horizontes cimentados.....	11
2.3.1 Considerações gerais.....	11
2.3.2 Fragipãs e duripãs.....	12
2.3.3 Fatores e processos atuantes na cimentação e endurecimento dos horizontes	14
2.3.4 Solubilidade do silício e sua atuação na cimentação dos horizontes.....	17
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	22
3.1 Caracterização geral da área e seleção dos perfis.....	22
3.2 Coletas das amostras e preparação para análise.....	25
3.3 Análise física.....	26
3.4 Análise química para caracterização geral.....	27
3.5 Análise por fluorescência de raios-x.....	27
3.6 Ataque sulfúrico.....	28
3.7 Extração por oxalato ácido de amônio.....	28

3.8 Análise mineralógica.....	28
3.9 Análises por microscopia.....	29
3.10 Laboratórios.....	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
4.1 Atributos morfológicos.....	31
4.2 Análise física.....	41
4.3 Análise química de caracterização geral.....	45
4.4 Análise por fluorescência de raios-x.....	49
4.5 Análise pelo ataque sulfúrico.....	51
4.6 Extração de amorfos por oxalato de amônio.....	58
4.7 Difratomia de raios-x.....	65
4.7.1 Mineralogia da Amostra Total.....	65
4.7.2 Mineralogia da Fração Argila.....	71
4.8 Análises por microscopia.....	77
4.8.1 Microscopia ótica.....	77
4.8.2 Microscopia eletrônica de varredura.....	90
4.9 Considerações Finais.....	100
5 CONCLUSÕES.....	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	102
APÊNDICES.....	118
1 Descrição morfológica dos perfis.....	119
2 Difratomogramas de raios-x da fração argila submetida a diferentes tratamentos....	131

# **GÊNESE E DEGRADAÇÃO DE DURIPÃS EM UMA TOPOSEQUÊNCIA DOS TABULEIROS COSTEIROS, CONDE – BA**

Autor: RICARDO ESPÍNDOLA ROMERO

Orientador: Prof. Dr. CELSO AUGUSTO CLEMENTE

## **RESUMO**

Os duripãs são horizontes cimentados que causam impedimento à penetração das raízes e da água. Comumente ocorrem em regiões áridas e semi-áridas, com grau variável de cimentação por sílica associada a carbonato de cálcio, podendo conter óxidos de ferro. A formação de duripãs está relacionada com áreas de depressões fechadas e vem sendo constatada nos Tabuleiros Costeiros, onde as precipitações pluviais são mais elevadas, porém, com indícios de que os agentes cimentantes apresentam composição diferente das observadas em ambiente de clima mais seco. Em função da escassez de informação sobre os duripãs de áreas mais úmidas e da importância dos solos dos Tabuleiros, desenvolveu-se este trabalho com os objetivos de caracterizar os agentes cimentantes dos duripãs, identificar processos que atuaram na gênese e os que podem agir na degradação dos horizontes cimentados nessas áreas. Para tanto, foi analisada uma topossequência localizada no município de Conde – BA, inserida na unidade dos Tabuleiros Costeiros, na qual são encontradas espessas camadas de duripã no topo da vertente. Foram utilizadas sete trincheiras para descrição morfológica e coleta das amostras dos horizontes. O material foi submetido a determinações químicas, físicas, mineralógicas e análises por microscopia ótica e eletrônica de varredura (MEV). Os

solos foram classificados como Argissolo Acinzentado Distrófico duripânico (PACd), Argissolo Amarelo Distrófico duripânico (PAd1), Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico (PAd2), Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico plíntico (PAd3), Argissolo Amarelo Distrófico plíntico (PAd4), Argissolo Amarelo Distrófico plíntico (PAd5) e Plintossolo Pétrico Concrecionário Distrófico típico (FFcd). Os resultados mostram que os solos são constituídos por material bastante intemperizado, de baixa fertilidade natural, com horizontes subsuperficiais argilosos a muito argilosos. A mineralogia dos duripãs é relativamente semelhante a dos horizontes não cimentados. Embora ocorram anatásio e gibbsita em alguns horizontes, a fração argila é predominantemente caulinitica, o que favorece a formação de uma matriz densa, observada nos duripãs. Os maiores teores de silício e alumínio amorfos são encontrados nos duripãs, concluindo-se que estes compostos atuam na cimentação destas camadas. A extração por oxalato de amônio também indica uma maior participação do alumínio como agente cimentante, pois as concentrações são maiores que as de silício. No entanto, os elevados teores de ambos os constituintes nas camadas cimentadas,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (22,96 g  $\text{kg}^{-1}$ ) e  $\text{SiO}_2$  (2,34 g  $\text{kg}^{-1}$ ), apresentam-se várias vezes superiores aos encontrados nos horizontes de baixa concentração, que são respectivamente de 1,51 g  $\text{kg}^{-1}$  para o alumínio e 0,13 g  $\text{kg}^{-1}$  para o silício. As análises revelam que os processos de acumulação de argila e de compostos químicos, tais como sílica e alumínio amorfos, estão associados à gênese dos duripãs. Com a acumulação de argila nos horizontes cimentados, observa-se uma redução dos poros interconectados e da porosidade em geral. Os compostos químicos acumulados em algumas zonas de poros das camadas cimentadas, apresentam feições de material criptocristalino, indicadas por MEV como áreas com concentrações de silício. Entretanto, zonas com desenvolvimento de uma porosidade mais interconectada e formação de microagregados sugerem a atuação de processos de degradação nesses duripãs.

# **GENESIS AND DEGRADATION OF DURIPANS IN A TOPOSEQUENCE AT THE COASTAL PLATEAUS, CONDE – BA**

Author: RICARDO ESPÍNDOLA ROMERO  
Adviser: Prof. Dr. CELSO AUGUSTO CLEMENTE

## **SUMMARY**

Duripans are cemented horizons that restrict root and water penetration into the soil. Duripans usually are located in arid and semi-arid regions, with variable degrees of cementation by silicon associated with calcium carbonate, and occasionally iron oxides. The duripans formation is associated with closed depressional areas, and it has been identified in Coastal Plateaus, where the precipitation is higher. However, there are evidences that cementing agents in these areas have different composition than those observed in drier environments. Given the importance of the Coastal Plateaus soils and the fact that little information is available about duripans in wetter environments, this work was developed with the objectives of characterizing the cementing agents of duripans, and identifying the processes related to: (i) duripan genesis and (i) the degradation of cemented horizons in these areas. To accomplish the proposed objectives, a toposequence located at Conde – BA the in Coastal Plateau unit was selected in which thick layers of duripan were identified in the top of the landscape. Seven soil profiles were used for morphologic description as well as to collect horizons samples. The material was analyzed for soil chemical, physical, and mineralogical properties, and to optic and scanning electron microscopy (SEM) analyses. The soils were classified as

Ultisols in Soil Taxonomy. The results show that the soils are composed of highly weathered material, with low natural fertility, and clay to very clay texture in subsurface horizons. The mineralogy of the duripans is somewhat similar to non cemented horizons. Although anatase and gibbsite occur in some horizons, the clay fraction is mostly kaolinitic, which may induce the formation of the dense matrix observed in duripans. High silicon and amorphous aluminum contents were found in duripans and this may indicate that these composts act in the cementation of these layers. The extraction with ammonium oxalate also indicated a larger participation of the aluminum as cementing agent, since its concentrations are greater than those of silicon. However, the high contents of both elements in the cemented layers ( $\text{Al}_2\text{O}_3 = 22,96 \text{ g kg}^{-1}$ ;  $\text{SiO}_2 = 2,34 \text{ g kg}^{-1}$ ), are several times greater than those found in lower concentration horizons ( $1,51 \text{ g kg}^{-1}$  to aluminum and  $0,13 \text{ g kg}^{-1}$  to silicon). The analyses have shown that the processes of accumulation of clay and chemical composts, such as silicon and amorphous aluminum, are associated with the genesis of duripans. Clay accumulation in cemented horizons caused a reduction in interconnected pores and in total porosity. The chemical composts accumulated in some pore zones of the cemented layers shown cryptocrystalline features, identified by SEM as silicon concentration areas. However, development of zones with a more interconnected porosity and micropeds formation suggests the actuation of degradation processes in these duripans.

## 1 INTRODUÇÃO

Os Tabuleiros Costeiros, com ocorrência em Estados da região Nordeste, Norte e Sudeste, representam uma significativa unidade geomorfológica desenvolvida a partir de sedimentos siliciclásticos da Formação Barreiras. Esses tabuleiros têm despertado grande interesse da comunidade científica nas diversas áreas do conhecimento devido às seguintes características: (i) apresentam grande extensão, com área aproximada de 200.000 km<sup>2</sup>; (ii) abrigam boa parte do remanescente da Mata Atlântica; (iii) dispõem de muitos solos associados a relevo plano e suave ondulado; (iv) possuem condições climáticas favoráveis ao uso agrícola; (v) apresentam disponibilidade de recursos hídricos de superfície e subsuperfície; (vi) abrangem muitos centros urbanos e capitais de Estados do Nordeste e (vii) têm ampla infra-estrutura de transporte rodoviário e de terminais marítimos para escoamento da produção.

Apesar das condições favoráveis citadas anteriormente, os solos deste ecossistema, em geral, são quimicamente de baixa fertilidade e apresentam limitações físicas relacionadas à presença de horizontes coesos, os quais vêm sendo há algum tempo estudados por diversos pesquisadores. Entretanto, esses problemas são agravados nas áreas onde ocorrem os duripãs, pois essas constituições chegam a causar o completo impedimento à penetração das raízes e da água.

Nos mapeamentos exploratórios e de reconhecimento, o aparecimento dos duripãs era considerado insignificante, entretanto, como ressaltam Boulet et al. (1998), com levantamentos mais detalhados, pode-se perceber que esses horizontes endurecidos estão disseminados pelos tabuleiros, limitando o volume útil do solo para as plantas e impondo fortes restrições ao abastecimento de água e suprimento de nutrientes.

Estas camadas cimentadas geralmente ocorrem em regiões áridas e semi-áridas, porém, os duripãs dos Tabuleiros Costeiros no litoral oriental do Brasil estão em clima mais úmido, sob precipitações pluviárias médias anuais variando de 1.000 a 2.300 mm.

Os duripãs são descritos como horizontes minerais que possuem grau variável de cimentação por sílica e que podem conter óxidos de ferro e carbonato de cálcio (Embrapa, 1999 e USDA, 1960). Porém, estudos indicam que, nos Tabuleiros Costeiros, os agentes cimentantes dos duripãs são o alumínio, a sílica e o ferro, na forma amorfa, não havendo associação com carbonatos de cálcio (Silva et al., 1997 e Boulet et al., 1998 Filizola et al., 2001).

Esses trabalhos mostram que os duripãs ocorrem em áreas deprimidas, nas quais o ambiente de formação está relacionado com solos que apresentam problemas de drenagem, com oscilação do lençol freático. Então, baseado na literatura, levantou-se a hipótese de que os duripãs estão em processo de degradação quando encontrados em ambiente de desestabilização, tais como no topo de vertentes onde não há represamento de água.

Em função da importância dos solos dos tabuleiros, da falta de esclarecimentos sobre os processos de formação e degradação dos horizontes extremamente cimentados e da presença desses duripãs em áreas elevadas sob condições de clima úmido, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo geral de analisar uma topossequência localizada no município de Conde – BA e estudar a degradação dos duripãs que se encontram no topo da vertente.

Como objetivos específicos este trabalho visou: (i) esclarecer quais os principais processos que contribuíram na gênese desses duripãs; (ii) identificar os componentes que estão atuando como cimentos nas condições de clima úmido; (iii) analisar os processos que podem estar degradando os duripãs.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Formação Barreiras**

A Formação Barreiras é uma unidade geológica que se estende desde o Estado do Rio de Janeiro até o Amapá e segue, ao longo da costa, uma faixa praticamente contínua e com largura variável. Litologicamente é constituída por sedimentos continentais pouco consolidados, geralmente afossilíferos, que variam de argilas a conglomerados (Mabesoone et al., 1972; Matoso & Robertson, 1959 e Suguio & Nogueira, 1999). Na Bahia, segundo Vilas Boas (1996), esta faixa tem até 15 km de largura e também pode aparecer separada da costa pelas formações quaternárias marinhas.

Para esclarecer que “Barreiras” está mais relacionado com os aspectos geográficos do que geológicos, Matoso & Robertson (1959) citam que este termo foi usado baseado nos escritos que Pero Vaz Caminha fez em 1500. Na carta, as barreiras brancas e vermelhas descreviam o terreno escarpado ou barranca, portanto, caracterizando uma feição geográfica da costa brasileira.

Além do termo Barreiras não ter sido de origem geológica, percebe-se que os sedimentos que o compõem foram descritos com diferentes nomenclaturas na bibliografia brasileira. Matoso & Robertson (1959) descreveram que “Barreiras” era usado tanto como “série” como “formação” geológica, entretanto, concluíram que estes materiais não constituíam unidade litológica nem genética e, assim, sugeriram a substituição da terminologia “Série Barreiras” e “Formação Barreiras” por “Formações Cenozóicas Indiferenciadas” ou “Cenozóico Indiviso”.

Observa-se que a sugestão de Matoso & Robertson não foi adotada, pois essa unidade litoestatigráfica é comumente denominada de Grupo Barreiras (Bigarella, 1975;

Mabesoone et al., 1972 e Vilas Boas, 1996), contudo, em artigo mais recente, Suguio & Nogueira (1999) ressaltam que é preferível designar como Formação (Fm.) Barreiras, terminologia que será adotada neste trabalho.

Toda esta celeuma, em torno da nomenclatura, pode ser justificada pela grande variabilidade de sedimentos na Formação Barreiras. Segundo Bigarella (1975), já era de se esperar que em diferentes áreas esses depósitos tenham litologias diversas, pois o processo de deposição é de origem principalmente continental.

Matoso & Robertson (1959) citam mais fatores para esta diversidade na litologia do Barreiras, pois: (i) além de origem continental, os sedimentos podem ser fluvial e lacustre, mas ainda é citada a possibilidade da origem marinha; (ii) ocorrem diversas discordâncias erosivas e angulares e (iii) podem ser identificados diferentes ambientes de sedimentação.

As pesquisas indicam que o processo de sedimentação da Formação Barreiras ocorreu, principalmente, em períodos que o nível relativo do mar chegou a ficar situado bem abaixo do atual, dessa forma, seus depósitos podem ser encontrados repousando sobre diferentes materiais: embasamento cristalino, formações cretáceas ou formações terciárias marinhas (Mabesoone et al., 1972 e Suguio & Nogueira, 1999).

Esses sedimentos sofreram pediplanações bem distintas (Bigarella & Andrade, 1964), onde o regolito era desenvolvido numa fase úmida (com os níveis dos mares mais altos) e, posteriormente, removido para as depressões do terreno quando o mar estava com níveis mais baixos (Bigarella, 1975).

Entretanto, a sedimentação da Formação Barreiras não está unicamente relacionada com os ciclos climáticos, pois, como cita Bigarella (1975) e Costa et al. (1993), um soerguimento epirogênico favoreceu a deposição (a jusante) dos sedimentos carregados pelos processos erosivos atuantes no interior.

Após passar por ações de intemperismo, erosão, transporte e deposição, observa-se que a mineralogia da Formação Barreiras não é complexa. A fração grosseira dos sedimentos é predominantemente constituída por quartzo, podendo ocorrer a presença de concreções ferruginosas, enquanto que, na fração argila, a caulinita é o

mineral dominante (Duarte et al., 2000; Jacomine, 1974, 1996; Melo et al., 2002a e Ribeiro, 1998).

Como a ocorrência do argilomineral caulinita está normalmente associada às áreas de intemperismo sob condições úmidas e quentes (Dixon, 1989), Bigarella (1975) ressalta que o processo de sedimentação da Formação Barreiras ocorreu em ambiente semi-árido, mas caracterizado por freqüentes enchentes rápidas, porém Mabesoone et al. (1972) sugerem a ocorrência de flutuações (paleo)climáticas no período de sedimentação.

Devido à raridade em se encontrar fósseis nos sedimentos da Formação Barreiras, a sua datação é difícil de ser realizada. Entretanto, em Brasil (1983) é citada a descoberta de um rico jazigo fóssil em argilas (Ouricanguihas – BA), datado como pliocênico. Porém, Suguio & Nogueira (1999) citam trabalhos realizados no Rio Grande do Norte e no Pará que permitem a datação de sedimentos do Mioceno. Usando análises paleomagnéticas, no Estado da Bahia, Suguio et al. (1986) concluíram que a sedimentação desse material ocorreu no Plioceno, entretanto, admitiram a possibilidade da Formação Barreira possuir idades mais antigas e mais recentes. O trabalho de Mabesoone et al. (1972) relatava esses períodos mais recentes, indicando que o processo de deposição deve ter se estendido até o Holoceno. Portanto, de uma forma geral, a Formação Barreiras pode ser mencionada como de idade Terciária-Quaternária (TQb) e, quando exposta à superfície, seus sedimentos originam os solos dos Tabuleiros Costeiros.

## **2.2 Solos dos Tabuleiros Costeiros**

### **2.2.1 Características gerais**

Tabuleiro é uma forma topográfica plana, de baixa altitude, sedimentar e que muitas vezes termina de forma abrupta (Guerra, 1978). As feições desse tipo que acompanham a costa brasileira são conhecidas como Tabuleiros Costeiros e, como estão associadas com a Formação Barreiras, também podem ser encontradas desde o Estado do Rio de Janeiro até o Amapá.

Na unidade geomorfológica dos Tabuleiros Costeiros, os solos são originados predominantemente dos sedimentos da Formação Barreiras (TQb) e ocupam uma área significativa do Nordeste brasileiro, abrangendo aproximadamente 10 milhões de hectares (Jacomine, 1996 e Souza, 1996). Sua importância para o Nordeste é destacada por Rezende (2000), o qual, baseado no Plano Diretor do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Tabuleiros Costeiros da Embrapa, cita que os Tabuleiros Costeiros contribuem com 26,4% e 38,2% do PIB gerado nessa Região pelas culturas temporárias e permanente, respectivamente.

Jacomine (1996) cita que essa importância dos solos dos Tabuleiros Costeiros para o Nordeste se deve principalmente aos seguintes fatores: estão em áreas com precipitações pluviárias mais uniformes, sem problemas de secas periódicas; normalmente apresentam boa profundidade e ocorrem em áreas que permitem a mecanização agrícola e, ainda, se localizam próximos a grandes centros consumidores que podem absorver a produção agrícola.

O relevo dos Tabuleiros Costeiros é geralmente plano a subplano, sendo comum altitudes que variam de 200 a 250 m. As classes de solos predominantes são os Latossolos e Argissolos Amarelos, porém também são encontrados Neossolos Quartzarênicos, Argissolos Vermelho-Amarelos e Acinzentados, Latossolos Vermelho-Amarelos, Espodossolos e Plintossolos (Jacomine, 1996; Ribeiro, 1996; Ribeiro, 1998 e Araújo Filho et al., 1999).

Os solos desse domínio possuem limitações - de natureza química e física - para a exploração agrícola, pois geralmente apresentam baixa fertilidade natural, aumento da acidez com a profundidade, caráter álico ou distrófico, baixa CTC, baixa capacidade de retenção de água e, embora sejam profundos, o aparecimento de horizontes coesos causam redução da profundidade efetiva. O horizonte coeso é muito duro quando seco e friável a muito friável quando úmido, podendo sua gênese estar associada a diversos processos pedogenéticos (Cintra et al., 1997; Jacomine, 1996; Ribeiro, 1996; Ribeiro, 1998 e Souza, 1996). Contudo, os problemas são mais graves nas áreas onde há impedimento à penetração das raízes e da água devido à presença de duripãs.

Embora as áreas planas dos Tabuleiros Costeiros sejam relativamente uniformes, observa-se micro relevos com pequenas depressões que causam significativas diferenças nos solos. Nessas áreas deprimidas, onde geralmente há problemas de drenagem, ocorrem Argissolos Acinzentados e até Espodossolos, podendo ser encontrados fragipãs e duripãs, como os descritos por diversos autores (Carvalho, 2001; Demattê et al., 1996; Filizola et al., 2001; Jacomine, 1974; Moreau, 2001; Silva et al., 1997 e Ucha et al., 2002).

### **2.2.2 Mineralogia**

A baixa fertilidade química, que é comum nos solos dos Tabuleiros Costeiros, está bem relacionada com a composição mineralógica e a gênese dos solos que ocorrem neste ambiente.

Nos solos desenvolvidos dos sedimentos da Formação Barreiras, a fração areia é constituída quase que exclusivamente de quartzo, podendo conter concreções ferruginosas e traços de muscovita, biotita, turmalina, rutilo, zircão, epidoto e ilmenita (Jacomine, 1996 e Ribeiro, 1998).

A fração argila desses solos tem baixos teores de ferro e é dominada pela caulinita. Este filossilicato chegou a ser citado por Melo & Santos (1996) como o único mineral presente (na fração argila) no solo, entretanto, ocorrências de gibbsita e pequenas proporções de anatásio, mica, zircão, rutilo e quartzo também são encontradas (Demattê et al., 1996; Duarte et al., 2000; Jacomine, 1974; Melo et al., 2002a e Moreau, 2001).

A composição dos solos constituída por esses minerais resistentes ao intemperismo é justificada, pois, como lembra Ribeiro (1996), esse material sofreu diversos ciclos (erosão, sedimentação e pedogênese), gerando um elevado grau de amadurecimento e certa uniformidade. Com esses processos, Melo et al. (2001) citam que houve favorecimento para a concentração de caulinita, na fração argila, e remoção de minerais como óxidos de ferro.

### 2.2.2.1 Caulinita

Os minerais de caulinita, que são os principais constituintes da fração argila dos solos dos Tabuleiros, apresentam forma hexagonal quando têm alta cristalinidade (Dixon, 1989), no entanto, no material da Fm. Barreiras analisado por Melo et al. (2002c), este formato estava presente somente em uma pequena proporção da caulinita.

Nos sedimentos estudados por Melo et al. (2002c), os teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  da caulinita foram semelhantes aos determinados com caulinitas de diversas classes de solos. Nesse trabalho com a Formação Barreiras os pesquisadores verificaram que, em profundidades maiores (10-15m), havia maior substituição de Al por Fe na estrutura das caulinitas, pois os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  foram maiores e a relação  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  foi máxima.

Na análise química da caulinita dos sedimentos Barreiras, Melo et al. (2002c) também encontraram titânio, que pode estar adsorvido ou atuar como um elemento estrutural, devido à substituição isomórfica. Entretanto, os autores também citam que, no trabalho de Nagelshmidt et al., a presença de Ti em caulinita (padrão da Geórgia) foi atribuída à associação com anatásio.

A caulinita existente nos solos dos Tabuleiros Costeiros geralmente é herdada dos sedimentos (TQb), no entanto, alguns autores também descrevem processos de neoformação. Duarte et al. (2000) encontraram zonas brancas, onde há acumulação de caulinita semelhante à descrita por Nahon (1991) como caulinita secundária, formada a partir da reprecipitação de sílica e alumina durante a laterização. Por outro lado, a ocorrência de lençol freático elevado foi, segundo UFV (1984), o fator responsável pela desferrificação da caulinita e, por consequência da cor branca.

A nova geração de caulinita é formada, segundo Nahon (1991), na zona de maior porosidade da matriz, para onde migra parte da alumina e da sílica liberadas na dissolução da caulinita primária. Essa dissolução pode ser provocada pelos prótons liberados durante a hidrólise do  $\text{Fe}^{3+}$ , na precipitação dos óxidos de ferro (hematita) como nódulo.

O aparecimento de nódulos de ferro na Fm. Barreiras é relativamente comum, pois, embora a mineralogia seja predominantemente caulínica, geralmente existem óxidos de ferro que, em alguns ambientes, se acumularam na forma de nódulos.

### 2.2.2.2 Óxidos de Ferro

Embora os teores de óxidos de ferro normalmente sejam baixos nos sedimentos da Formação Barreiras, o tipo e a concentração dos óxidos de ferro ocasionam uma grande variação de cores. Melo et al. (2002a) citam que os horizontes do solo passam de matiz 10 YR (B e BC) para 5 YR (C) e, próximos do lençol freático, os sedimentos apresentam coloração variegada. Em profundidades maiores a matriz chega a ser branca (N 8/) com pontos rosados (2,5 YR). A variabilidade de cores nos solos dos Tabuleiros é amplamente encontrada nos diversos levantamentos (Brasil, 1972; Brasil, 1973a; Brasil, 1973b; Brasil, 1983).

Nos principais solos dos Tabuleiros Costeiros, originados principalmente da Fm. Barreiras, o ferro é, conseqüentemente, um dos constituintes que aparece em pequenas proporções. Segundo Duarte et al. (2000), os teores de ferro geralmente variam de 20 a 100 g kg<sup>-1</sup> e podem ser inferior a 10 g kg<sup>-1</sup> nas áreas com problemas de drenagem.

Num estudo com material da Fm. Barreiras no Espírito Santo, Melo et al. (2002a) descrevem que os teores de goethita diminuem com a profundidade, enquanto a hematita apresenta teores muito baixos, com incrementos nas camadas concrecionárias.

As feições originadas pelos processos de segregação e concentração de ferro, tais como nódulos e/ou mosqueados, comumente ocorrem nos sedimentos e solos dos Tabuleiros. Duarte et al. (2000) e Melo et al. (2002a) relatam a presença de camadas enriquecidas de nódulos vermelhos com recobrimento amarelo, descritos pelos primeiros autores como nódulos hematíticos recobertos por goethita.

Esse recobrimento é comum nos horizontes superficiais de perfis com intemperismo laterítico, podendo ser atribuído a um processo de degradação, no qual a hematita origina goethita com baixa substituição em Al (Tardy & Nahon, 1985).

Contudo, o trabalho de Duarte et al. (2000) não indica esta gênese para a goethita, pois, não foi encontrada diferença substancial entre as amostras de núcleos vermelhos e das capas amarelas. Então, como a substituição em Al nas goethitas é semelhante a dos núcleos vermelhos, os indícios são de que ambas se formaram no mesmo ambiente (Fitzpatrick & Schwertmann, 1982).

Para Duarte et al. (2000), outro indício de que as capas de goethitas não são formadas pela reidratação da hematita, é devido à remoção seletiva preferencial da hematita e, conseqüentemente, a permanência da goethita como um resíduo mais resistente. Os autores fizeram essa sugestão baseados no maior teor de ferro livre (dicionito) nos núcleos e, também, porque goethitas primárias nas capas amarelas e nos núcleos vermelhos.

No trabalho com material da Fm. Barreiras, Melo et al. (2002c) encontraram que as características mineralógicas da hematita e goethita, tais como, nível de substituição isomórfica por Al, grau de cristalinidade, tamanho e forma do mineral, apresentavam diferenças conforme o material de origem, grau de intemperismo e condições biopedoclimáticas.

Como pode ser visto, a hematita pode ser encontrada nos Tabuleiros Costeiros, sendo que a goethita é o principal óxido de ferro nestes solos. No entanto, a presença de lepidocrocita também já foi descrita (Melo & Santos, 1996).

Usando oxalato de amônio para extrair óxidos de ferro e alumínio de baixa cristalinidade, Melo et al. (2002a) encontraram pequenas quantidades desses óxidos nos sedimentos da Formação Barreiras em Aracruz – ES. No entanto, citam que os maiores teores estavam nas amostras superficiais, o que pode se relacionar com o efeito da matéria orgânica (Kämpf & Schwertmann, 1983).

## 2.3 Horizontes cimentados

### 2.3.1 Considerações gerais

Horizontes minerais fortemente endurecidos por cimentação podem ser encontrados em solos de diferentes partes do mundo e, embora sejam mais comuns nas regiões áridas, ocorrem até em locais com regime hídrico úmido.

As camadas cimentadas ou crostas endurecidas recebem diferentes denominações, as quais são originadas em função do agente cimentante que ocorre de forma predominante. Dessa forma, Watson (1992) e Tardy (1992) citam: silcrete ou duripã (devido à sílica), calcrete (carbonatos), gipcrete (gipso), salcrete (halita) e ferricrete (óxidos de ferro). Embora Goudie (1973) mencione ainda outros tipos de camadas cimentadas (magnesianes, foscretes), o autor afirma que os mais comuns são silcrete (duripã), calcrete, ferricrete e gipcrete.

Devido à textura dos evaporitos ser semelhante a das crostas, como por exemplo, de gipsita, Aref (2003) destaca que os gipcretes podem ocorrer em diferentes declives e posições topográficas, além de apresentarem horizontes com nítidas diferenças, que não são observados nos evaporitos. Outra distinção, que se refere à gênese, é que essas crostas são formadas por processos atuantes na zona de intemperismo (Goudie, 1973).

Segundo Watson (1992), gipcrete e salcrete são originados exclusivamente em regiões áridas, enquanto que calcretas e duripãs também podem ocorrer em áreas mais úmidas. De acordo com Tardy (1992), para a formação dos ferricretes é necessário um ambiente mais úmido, que permita estágios sucessivos para o solo ficar temporariamente úmido e temporariamente seco.

No Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 1999), observa-se que os termos duripã (sílica), petroplíntico (óxidos de ferro), petrocálcico (carbonato) e *ortstein* (material orgânico com ferro e alumínio) são usados pela pedologia para designar horizontes extremamente cimentados.

Como pode ser observado, dependendo das condições e dos processos envolvidos, os horizontes endurecidos são comumente cimentados por diferentes

constituintes. No entanto, em muitos casos é difícil identificar o agente dominante na cimentação, mas Nash & Shaw (1998) indicam que os principais componentes mencionados pelos pesquisadores são sílica e carbonato de cálcio. Nas estruturas onde a sílica pode atuar como principal agente cimentante, os estudos têm dado ênfase predominantemente aos duripãs (extremamente cimentados) e fragipãs (com cimentação menos intensa).

### **2.3.2 Fragipãs e duripãs**

O conceito de duripã como horizonte diagnóstico no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 1999) corresponde parcialmente ao conceito de “indurated pans” da Soil Taxonomy (USDA, 1994), possuindo as seguintes características: (i) consistência muito firme ou extremamente firme quando úmido e extremamente duro, quando seco; (ii) os fragmentos secos não se esboroam, mesmo depois de prolongado período de umedecimento; (iii) os revestimentos de sílica presentes são insolúveis em solução de HCl 1N, porém são solúveis em solução de KOH concentrada e aquecida ou quando submetido a tratamentos sucessivos de ácido e álcali e (iv) as raízes das plantas e água não penetram na parte cimentada.

Embora o termo duripã seja usado como sinônimo de silcretes, alguns autores podem caracterizá-los de forma diferente. Milnes & Thiry (1992) citam que o endurecimento de silcretes é tão forte, que chegam a descrevê-los como “rochas” formadas pela cimentação de material inconsolidado por sílica secundária, incluindo opala, quartzo criptocristalino ou quartzo bem cristalizado. Abdel-Wahab et al. (1998) trabalharam com dois tipos de silcretes, um deles é semelhante ao duripã - pedogenético, enquanto o outro é denominado “não pedogenético”, com quartzo precipitado em águas intempéricas aquecidas (75° a 88° C) de fontes termais. Já para Watson (1992), os termos duripãs e silcretes são sinônimos, os quais constituem horizontes minerais endurecidos compostos principalmente por sílica. Contudo, os artigos de silcretes que serão mencionados neste trabalho, serão aqueles em que a descrição se enquadra como duripã.

As camadas de crostas endurecidas (*duricrusts*) são denominadas de silcretes *stricto sensu* quando contêm no mínimo 85% de sílica (Summerfield, 1983). Os silcretes são resultantes de materiais superficiais, tais como, rochas, sedimentos, saprolitos ou solos, que sofreram cimentação por diversas formas de sílica secundária, portanto, esta silicificação envolve processos físico-químicos de baixa temperatura, não estando associada às altas temperaturas vulcânicas nem ao metamorfismo (Milnes e Thiry, 1992).

Silcretes com grandes espessuras (1-4m) também foram descritos na África por Abdel-Wahab et al. (1998). No entanto, os pesquisadores estimaram que a precipitação da sílica foi feita sob elevadas temperaturas ( $> 70^{\circ} \text{C}$ ), indicando que o *sill* de rocha básica teve influência pelo incremento de temperatura, embora não tenha contribuído com o aporte de Si. Na América do Sul, espessos duripãs ( $\geq 1 \text{ m}$ ) foram encontrados por Eash & Sandor (1995) num vale andino do Peru, região onde há material de origem derivado de rocha vulcânica.

Nos Tabuleiros Costeiros da Bahia, a presença de espessas camadas de duripãs e fragipãs (Fortunato et al., 2001 e Ucha, 2000) foi confirmada usando-se Radar Penetrante no Solo (GPR), pois, como essas feições são bem marcantes, podem ser claramente identificadas ao longo do perfil obtido pelo radar (Ucha et al., 2002). Espessa camada de duripã ( $> 1 \text{ m}$ ) também foi descrita em depressões dos Tabuleiros do Estado de Alagoas, Demattê et al. (1996) encontraram acumulação de ferro e sílica amorfa, provocando a cimentação de duripãs e fragipãs. Segundo esses autores e, ainda, conforme já observado por Jacomine (1974), o grau de cimentação e a profundidade de ocorrência depende do relevo, pois a gênese desses pãs está relacionada com a deficiência da drenagem e os ciclos de umedecimento e secagem.

Nas áreas com desenvolvimento de duripãs é comum se encontrar horizontes com fragipã. Portanto, os estudos deste material são importantes para uma melhor compreensão sobre os duripãs, pois, embora a cimentação seja menor, a ocorrência é maior e o número de trabalhos enfocando os fragipãs é bem mais elevado.

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 1999) conceitua fragipã como um horizonte mineral subsuperficial, com baixo conteúdo de matéria

orgânica, densidade mais elevada que os horizontes subjacentes, aparentemente cimentado quando seco e, conseqüentemente, apresentando consistência dura a extremamente dura. Porém, quando úmido a quebradice é fraca a moderada e seus fragmentos quando estão sob pressão não sofrem deformação lenta, mas tendem a romper-se subitamente.

A quebradice, segundo Grossman & Carlisle (1969), é a propriedade mais utilizada no campo para fazer a distinção entre fragipã e outros horizontes do solo. Lindbo & Veneman (1989) supõem que este fenômeno do súbito rompimento é devido à cimentação das partículas.

Segundo a descrição de Attou & Bruand (1998), a maioria dos autores inicialmente acreditava que os fragipãs da Europa foram formados em condições periglaciais, porém, os pesquisadores norte-americanos relacionaram os fragipãs ao clima temperado. No entanto, já há bastante tempo Jacomine (1974) também trabalhou com fragipã em região quente e úmida.

A resistência que os fragipãs apresentam quando estão secos, é atribuída a pontes de argila que ligam os grãos do esqueleto (Lindbo & Veneman, 1993), mas também são citadas ações de agentes cimentantes tais como material amorfo ou pobremente cristalizado (Franzmeier et al., 1989).

### **2.3.3 Fatores e processos atuantes na cimentação e endurecimento dos horizontes**

Nas pesquisas que procuram compreender a gênese de camadas endurecidas e cimentadas são citados processos que envolvem iluviação de material (DeKimpe et al., 1972) e interações face-a-face entre as partículas do solo (Attou & Bruand, 1998), adensamento causado pelo arranjo das partículas (Bryant, 1989), acumulação e precipitação de sílica (Franzmeier et al., 1989; Norton, 1994) e/ou outros constituintes que podem atuar na cimentação (Chadwick et al., 1987a; Karathanasis, 1989 e Smeck et al., 1989).

A característica hidráulica do ambiente é considerada como um fator determinante no desenvolvimento da cimentação. Para alguns pesquisadores, a presença

de lençol freático temporário na estação úmida seguida de grande processo de secagem na estação seca, pode ser necessária, pois causaria condições favoráveis para dispersão e posterior formação de cutãs e pontes de argilas (Lamotte et al., 1997a, b). Outros pesquisadores descrevem processos que necessitam de umidade para a formação de ácido silícico na solução do solo e, posteriormente, condições de solo seco para que haja a precipitação deste composto (Chadwick et al., 1987a e Franzmeier et al., 1989).

O meio ácido foi considerado como uma das condições que favorece a formação de componentes minerais atuantes como agente ligante (Franzmeier et al., 1989), além da acidez também favorecer a dispersão de partículas de argila. Isto explica, segundo Attou & Bruand (1998), porque os fragipãs se formam na ausência de carbonatos ou em solos que apresentem baixos teores. No entanto, duripãs e outros horizontes endurecidos podem ser encontrados cimentados concomitantemente por sílica e  $\text{CaCO}_3$  (Blank & Fosberg, 1991; Blank et al., 1998; Chadwick et al., 1987a, b; Eash & Sandor, 1995 e Nash & Shaw, 1998), embora os duripãs estudados por Blank et al. (1998), tenham sido caracterizados como de natureza poligenética.

Estudando o endurecimento de solos do trópico semi-árido, Lamotte et al. (1997a, b) constataram que a interação entre as partículas de argila causava endurecimento quando o solo estava seco, não havendo necessidade de agentes cimentantes. Attou & Bruand (1998) usaram silte e argila, obtidos do horizonte B de um solo, para fazer misturas mecânicas com amostra úmida (na forma de pasta) e seca. Estes pesquisadores observaram na análise micromorfológica que, após um único processo de dessecação, a mistura em pasta já apresentava a matriz com uma fábrica mais densa e menor porosidade.

Utilizando misturas com areia e argila, Singer et al. (1992) descreveram matriz semelhante, mas também constataram que com o aumento dos ciclos de umedecimento e secagem havia aumento de revestimento (cutãs) e pontes de argila, indicando que estes ciclos causam dispersão e reorganização de novas partículas de argila.

O período de umedecimento proporciona a dispersão de material fino na matriz do solo e o ciclo de dessecação favorece a reorganização como cutãs. Isto explica porque fragipãs podem ser formados sob diferentes condições climáticas e porque todos

os fatores favoráveis à dispersão de argilas (descarbonatização, dessaturação das partículas de argila, presença de sódio, etc.) podem contribuir para formação de fragipãs (Attou & Bruand, 1998).

Outros estudos direcionados para a determinação dos agentes ligantes responsáveis pela coesão, assim como, análises ‘in situ’ de seções finas, também indicam que as partículas de argila são suficientes para a gênese de horizonte endurecido do tipo fragipã (James et al., 1995 e Lamotte et al., 1997b). Para Attou & Bruand (1998), essa gênese de fragipã envolvendo predominantemente ciclos de umedecimento e secagem não exclui uma cimentação secundária por minerais pobremente cristalinos, amorfos ou compostos orgânicos, porém, não é uma característica essencialmente comum para fragipãs.

No entanto, a presença de agentes químicos tem sido citada na cimentação de fragipãs e duripãs. Chadwick et al. (1987a) e Franzmeier et al. (1989) apresentaram modelos que mostram o processo de precipitação de sílica na cimentação de fragipãs. Entretanto, Wilson et al. (1996) trabalhando em áreas de ocorrência de rochas vulcânicas básicas, encontraram que a alofana estava atuando como principal agente cimentante em alguns horizontes, podendo, ainda, ter contribuição da caulinita, gibbsita e óxidos de ferro.

Chadwick et al. (1987b) relatam que opalas secundárias são importantes para a cimentação de horizontes endurecidos, entretanto, os autores trabalharam em área onde havia vidro vulcânico. Blank & Fosberg (1991), estudando duripãs em sedimentos eólicos, também detectaram que o material silicoso associado à calcita era predominantemente opala-A. Já a fração argila, dos duripãs estudados por Blank et al. (1998), apresentou uma mineralogia dominada por opala-A e sepiolita.

Entretanto, Sullivan & Koppi (1995) chegaram a encontrar cristais de celestobarita, minerais membros da solução sólida de barita ( $\text{BaSO}_4$ ) e celestita ( $\text{SrSO}_4$ ), em duripãs da Austrália.

Embora a gibbsita seja considerada desorganizadora, pois atrapalha o ajuste face-a-face das caulinitas (Resende et al., 1995), este mineral foi encontrado em

horizontes de solos com fragipãs e duripãs na área de Tabuleiros Costeiros estudada por Moreau (2001).

Alguns pesquisadores descreveram duripãs que se desenvolveram de materiais vulcânicos, onde o rápido intemperismo do vidro vulcânico solubiliza a sílica, a qual sofre percolação (com a solução do solo) para os horizontes inferiores e se precipita, causando a cimentação (Chadwick et al., 1987a).

Para a formação dos duripãs, Blank & Fosberg (1991) acreditam que a contribuição do material silicoso, que está no horizonte de cimentação, é tão intensa ou maior do que a adição de sílica pela solução de percolação concentrada, já para Thiry & Millot (1987), a precipitação de sílica nos silcretes é causada pela evaporação.

#### **2.3.4 Solubilidade do silício e sua atuação na cimentação dos horizontes**

O silício é um importante elemento no ciclo geoquímico, pois é o principal constituinte dos sólidos da crosta terrestre. Os trabalhos mais antigos, envolvendo a dissolução de minerais com silício, dão ênfase à sílica monomérica ( $\text{Si(OH)}_4$ ), que é a forma predominante. Entretanto, em ambientes naturais com soluções ácidas ricas em cátions bivalentes, ácidos (poli)silícicos podem aparecer como um componente metaestável durante alguns meses (Dietzel, 2000).

A presença de sílica como cimento, aparentemente não afeta a CTC e a área de superfície específica, no entanto, apenas pequena quantidade deste cimento já é suficiente para profundos efeitos nas propriedades físicas, deixando o material duro a extremamente duro quando seco (Drees et al., 1989).

A contribuição dos organismos nos teores de sílica no solo (ciclagem) geralmente não é levada em consideração. No entanto, a sílica biogênica ocorre em regiões temperadas, tropicais e semi-áridas (Clarke, 2003) e, para a maioria dos solos, estima-se teores com no mínimo 3% de opala biogênica (Drees et al., 1989).

As formas de sílica não cristalinas são bem mais solúveis do que as cristalinas (Oehler, 1979). Segundo Drees et al. (1989), a sílica amorfa é no mínimo 10 vezes mais solúvel que o quartzo.

Como a opala biogênica tem elevada solubilidade, Clarke (2003) afirma que este constituinte pode ser uma fonte da sílica precipitada em regolitos e cita que, a partir dos anos 50, trabalhos associavam o desenvolvimento de silcretes à opala biogênica.

Dentre os horizontes minerais dos perfis de solo, é na camada superficial mais rica em matéria orgânica (A) que ocorre a maior acumulação de opala biogênica (Oehler, 1979). No entanto, Clarke (2003) cita trabalhos onde há concentração deste constituinte no horizonte B.

Devido a essa maior taxa de dissolução da opala biogênica, Alexandre et al. (1997) também constataram que este polimorfo tem mais ação na reciclagem do silício no solo do que as formas cristalinas. Os pesquisadores encontraram precipitação de sílica amorfa até na camada subsuperficial (180 cm) do solo, onde havia uma solução supersaturada, iniciando o processo de cimentação.

Drees et al. (1989) citam trabalhos que abordam a transformação de opala para quartzo em duripãs e solos cimentados por sílica, o que pode levar de 4 a 5 milhões de anos em uma temperatura de 50° C ou 180 milhões de anos a 20° C.

Gérard et al. (2002) destacam que há controvérsias quanto ao tempo médio dos fitólitos na ciclagem de sílica, pois citam que estes constituintes podem permanecer menos de dois meses em solos de floresta tropical chuvosa, porém, sob florestas temperadas podem passar de 1 a 300 anos para serem solubilizados e reciclados.

Em regiões com clima árido ou semi-árido, (Drees et al., 1989) descreve que a opala inorgânica atua como um importante cimento nos horizontes de duripãs e observou que os fitólitos normalmente são enriquecidos com Ti. Clarke (2003) cita que alto nível de titânio é encontrado em silcretes, o que é um fato importante na associação da opala biogênica com estas camadas cimentadas, mas reconhece que este material não deve ser o único responsável pelo desenvolvimento dos silcretes.

No modelo proposto por Chadwick et al. (1987a) para a cimentação de duripãs em ambiente árido e semi-árido, a sílica é precipitada na forma de opala após a solução do solo ter passado por processo de secagem. O modelo de cimentação para fragipãs descrito por Franzmeier et al. (1989) é semelhante, sendo que o processo é influenciado pela ação dos vegetais: as raízes absorvem preferencialmente água, causando um

aumento na concentração de ácido silícico na solução do solo. Após a remoção da água dos poros menores, a sílica se precipita formando pontes de ligação entre as partículas do solo. Segundo Norton (1994), normalmente essas pontes de sílica não são observadas na micromorfologia, entretanto, em alguns casos, quando há um grande volume de sílica cimentando os duripãs, tais estruturas podem ser observadas na microscopia ótica.

Em solos *hardsetting*, que apresentam camadas fortemente endurecidas quando seco, a gênese está relacionada com o umedecimento e secagem cíclicas do solo, porém, a cimentação também pode ocorrer como resultado da liberação da sílica solúvel durante o umedecimento e reprecipitação com o solo seco (Chartres & Norton, 1994 e Chartres et al., 1990).

Os *hardsettings* apresentam grandes similaridades com os horizontes coesos (Giarola & Silva, 2002), que comumente ocorrem nos solos dos Tabuleiros Costeiros. A gênese da camada coesa pode estar envolvida com diversos processos químicos e físicos (Cintra et al., 1997), entretanto, Ribeiro (2001) indica uma fraca cimentação por sílica amorfa nestes horizontes coesos.

Para Araújo Filho et al. (2001), tanto a sílica como um material sílico-aluminoso devem atuar como agentes cimentantes temporários dos horizontes coesos, pois, no período em que o solo está seco, processos de polimerização e precipitação fazem com que haja uma máxima expressão da coesão. No entanto, a despolimerização da sílica e dos aluminossilicatos pode ocorrer no período úmido, levando o material a apresentar uma condição de friabilidade.

Na cimentação de fragipãs, Karathanasis (1989) também indica que soluções ricas em Si podem causar precipitação de sílica amorfa e aluminossilicato amorfo, que após o período de dessecação ficam irreversivelmente endurecidos.

Em um solo sob floresta, na França, Gérard et al. (2002) constataram que a concentração de Si nas soluções capilares variava com as estações climáticas, sendo máxima no verão e mínima no inverno (estação que predominam as chuvas), porém, o inverso acontecia com as soluções lixiviadas. Os pesquisadores também observaram que as maiores concentrações (em todas as estações) ocorriam nas camadas mais profundas do solo (60 e 120 cm) do que próximo à superfície (15 e 30 cm).

Várias pesquisas têm mostrado que o Si atua na cimentação de horizontes e camadas, apresentando correlações positivas entre a resistência do solo e o Si extraível, relação Si/Al ou Si/(Si+Al) (Duncan & Franzmeier, 1999; Franzmeier et al., 1996; McBurnet & Franzmeier, 1997 e Norfleet & Karathanasis, 1996).

Nos solos com fragipãs estudados por Norfleet & Karathanasis (1996), os teores de Si extraídos por oxalato de amônio não apresentaram boa relação com os fragipãs, no entanto, as relações Si/(Si+Al) e Si/(Si+Al+Fe) mostraram tendências de serem mais elevadas nos horizontes mais fortemente cimentados.

Depois que Norfleet & Karathanasis (1996) incluíram o citrato-ditionito-bicarbonato na seqüência de extração, foi observado um grande incremento nos teores de Si e Al. Com este fato, os pesquisadores indicaram que os óxidos de Fe podem atuar como barreira na extração de aluminossilicatos amorfos. Nesta extração, a relação Si/(Si+Al) foi um parâmetro que apresentou boa relação com os horizontes fragipânicos, destacando-se que quando a relação apresentava índice superior a 0,5 o fragipã era mais resistente à compressão.

McBurnett & Franzmeier (1997), estudando horizontes cimentados, encontraram que o ferro e o alumínio extraídos por oxalato se correlacionaram de forma negativa com a resistência de ruptura do microagregado. No entanto, o Si (oxalato e ditionito) acompanhou o comportamento da resistência, apresentando uma correlação positiva.

Ao comparar as relações Si/Al com a resistência do solo, McBurnett & Franzmeier (1997) encontraram que, usando o DCB, todos os perfis (6) apresentaram correlação positiva, mas com o oxalato, três perfis não apresentaram correlação significativa. Com solos *hardsetting*, Franzmeier et al. (1996) encontraram comportamento semelhante, apresentando correlação positiva entre a resistência de ruptura e a relação Si/Al (oxalato).

Em sedimentos da Formação Barreiras (ES), apenas uma pequena fração de sílica, alumina e aluminossilicato foi removida pelo extrator (NaOH) usado por Melo et al. (2002a) e, devido aos valores da relação  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , esta remoção foi atribuída à caulinita que possui menor cristalinidade. No entanto, como Melo et al. (2001)

constataram que, nas áreas estudadas, a caulinita apresenta baixo grau de cristalinidade e outros trabalhos indicam teores mais elevados de sílica amorfa no Barreiras (Duarte et al. 2000), Melo et al. (2002a) concluíram que o método empregado – com NaOH – não é adequado para a extração em solos e sedimentos desenvolvidos sob condições tropicais úmidas.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Caracterização geral da área e seleção dos perfis**

O estudo foi realizado no Município de Conde na região do Litoral Norte do Estado da Bahia. A área está inserida na Fazenda Altamira da empresa Copener Florestal e localiza-se entre as coordenadas 11° 40' e 11° 50' de latitude Sul e 37° 40' e 37° 50' de longitude Oeste (Figura 1). A toposseqüência se encontra ao lado da estrada de terra da fazenda, numa distância de 5 km da margem esquerda da Rodovia BA 233, que liga o Município de Conde ao de Esplanada, sendo que estrada de terra está a 22 km da sede Conde.

Segundo a classificação de Köppen, o clima da área é do tipo Am, tropical chuvoso, de monção, apresentando inverno seco, precipitação inferior a 60 mm no mês mais seco e temperatura média superior a 18° C no mês mais frio (Brasil, 1983).

A área está situada entre dois pontos que, com base na média de 25 anos (Bahia, 1976), apresentam precipitações pluviiais anuais de 1104 mm e 1438 mm, como pode ser visto na Tabela 1. No mesmo período, essas localidades atingiram temperaturas médias de 24,3° e 25,2° C, respectivamente.

A vegetação primária da região está sob o contato savana – floresta estacional, entretanto, foi substituída por reflorestamento com pinheiro (Brasil, 1983) e, atualmente, vem sendo utilizada para a exploração de eucalipto.

Os solos estão inseridos no ambiente geomorfológico dos Tabuleiros Costeiros e são originados do material da Formação Barreiras, a qual, segundo Vilas Boas (1996), engloba quase todos os sedimentos terciários da Bahia e é composta por uma seqüência de materiais terrígenos, pouco ou não consolidados, geralmente de cores variegadas,

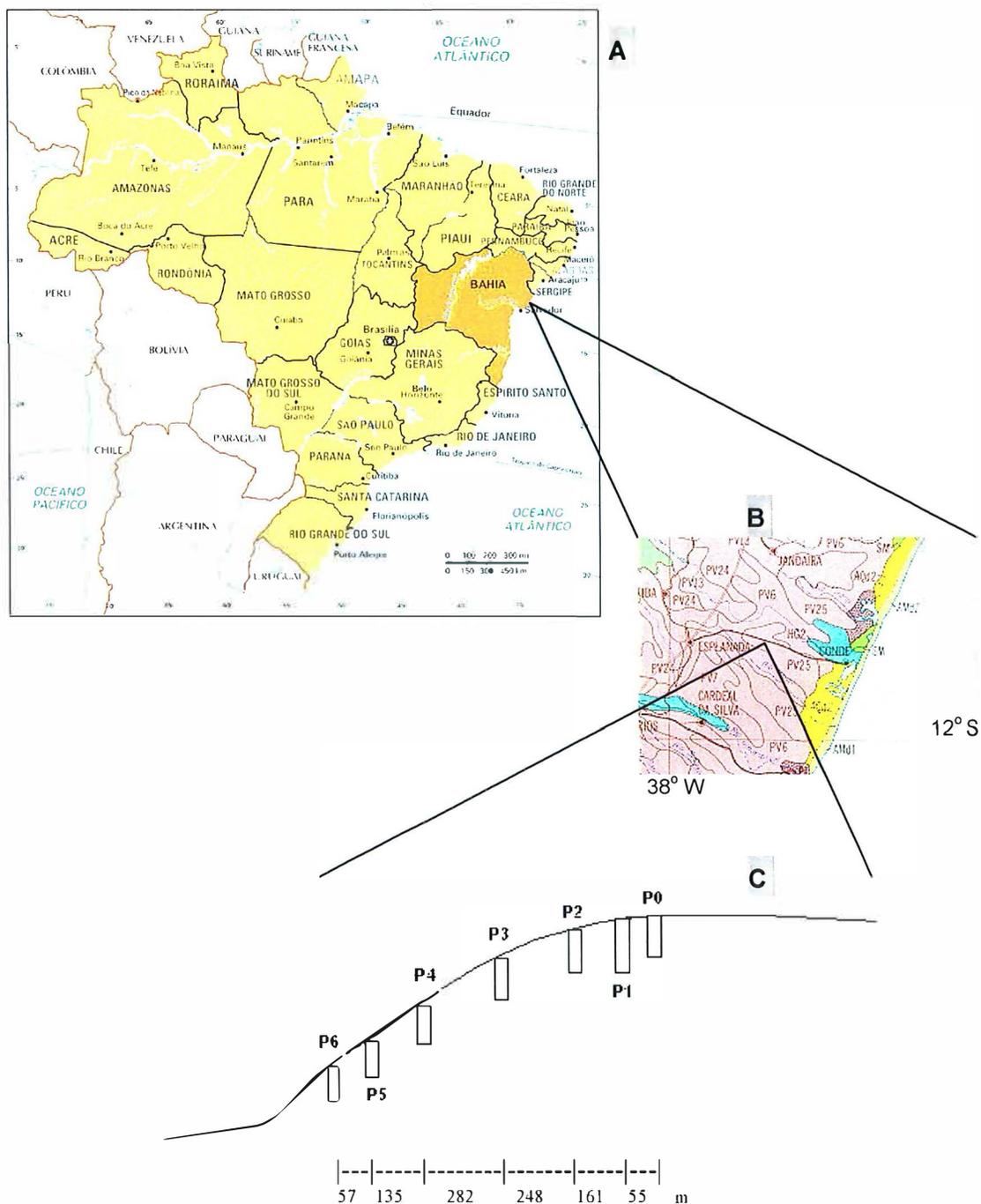


Figura 1 - Mapa do Brasil (A) destacando a Bahia, Estado onde foram desenvolvidos os trabalhos de campo. Detalhe (B) do mapa de solos (Brasil, 1976) abrangendo a área de estudo. Esquema representando a distribuição dos perfis (C) com as respectivas distâncias (metros) entre eles.

com estratificação irregular e normalmente indistinta, com granulometria que varia de argila a cascalho e comumente afossilífero.

A área foi previamente selecionada devido à existência de uma espessa camada de duripã no topo da vertente, ponto que se determinou para a primeira trincheira. Distanciando-se 55 m do primeiro ponto foi aberta a segunda trincheira que, embora apresentasse duripã próximo à superfície, possuía camada fortemente cimentada com menor espessura.

Para a escolha das outras trincheiras adotou-se a metodologia estrutural descrita por Boulet (1988), onde as observações foram feitas por sondagens com trado ao longo de uma transeção locada topograficamente. Se duas observações consecutivas eram diferentes, não permitindo que os horizontes dos solos fossem relacionados lateralmente, efetuava-se uma nova sondagem intermediária. Dessa forma, foram encontradas as diferentes unidades de solo e selecionados os locais para abertura das trincheiras mais representativas.

Tabela 1. Precipitação pluvial mensal e total (anual) em duas localidades próximas à área de estudo.

Município/ coordenadas	Precipitação pluvial*												Total
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	
	----- mm -----												
Conde/ 11° 49'S e 37° 36'W	55	77	130	206	249	167	168	129	66	56	78	57	<b>1438</b>
Esplanada/ 11° 49'S e 37° 36'W	52	56	92	140	174	115	128	93	55	46	76	77	<b>1104</b>

\* Média de 25 anos. Adaptado de Bahia (1976).

Foram selecionados 7 (sete) locais para abertura de trincheiras (Figura 1C), os quais representam as principais modificações encontradas na topossequência. Os perfis dessas trincheiras, denominados de P0, P1, P2, P3, P4, P5 e P6, foram analisados detalhadamente para avaliação macroscópica das organizações estruturais e, em seguida,

adotando o procedimento relatado por Lemos & Santos (1996), foi realizada a identificação/separação dos horizontes juntamente com a descrição morfológica.

### **3.2 Coletas das amostras e preparação para análise**

As amostras dos horizontes foram coletadas em sacos plásticos, transportadas para o laboratório, secas ao ar, peneiradas em tamis com abertura de 2,0 mm para se obter a terra fina seca ao ar (TFSA) e, assim, submetidas às análises para caracterização física, química e mineralógica.

As amostras indeformadas, para o estudo micromorfológico, foram coletadas em caixas (de papelão) tipo kubiena, com dimensões 10 x 6 x 5 cm. Para cada amostra um bloco de solo foi esculpido (do tamanho da caixa) com o auxílio de uma faca. Devido à dificuldade de se obter um molde com as dimensões da caixa, algumas amostras de horizontes cimentados foram coletadas retirando-se grandes torrões (marcando-se a orientação). Em seguida, a amostra foi recoberta com filme de plástico e fita adesiva e acondicionada em embalagem acolchoada para transporte.

A seleção dos horizontes para coleta de amostras indeformadas foi feita de acordo com a ocorrência de material cimentado e/ou de camadas que estão no topo dos horizontes de iluviação do perfil do solo. O perfil P1, que apresenta diferentes graus de cimentação, foi escolhido para avaliar as variações ao longo do perfil, sendo analisado todos os horizontes.

As amostras indeformadas foram transportadas para o laboratório, secas ao ar e, antes de serem submetidas à impregnação, passaram quatro dias em estufa de circulação forçada a uma temperatura de 35° C.

A impregnação foi executada de acordo com a Embrapa (1997), no entanto, houve alteração no processo de adição da resina, já que a mesma não foi feita de forma contínua e utilizou-se um dessecador comum, sem funil acoplado. O recipiente com a amostra foi colocado dentro do dessecador e recebeu uma pequena quantidade de solução com resina, de tal forma que esse volume inicial atingiu a altura aproximada de 1 cm da base, então, o dessecador foi fechado e acionado o vácuo. Posteriormente, a

cada 2 horas a resina foi adicionada seguindo-se a frente de molhamento, até cobrir o topo da amostra.

Decorrido o prazo de endurecimento (1 semana) da resina, realizou-se o corte para montagem e polimento da amostra, também seguindo Embrapa (1997), obtendo-se, assim, as lâminas delgadas com aproximadamente 30  $\mu\text{m}$  de espessura.

### 3.3 Análise física

Na análise granulométrica, o solo foi submetido à dispersão com solução de hexametáfosfato de sódio a 0,1 N e agitação por 16 horas. Em seguida, separou-se silte + argila da fração areia por peneiramento “via úmida” (Embrapa, 1997). Após secagem, a areia foi subdividida por peneiramento nas frações (Gee & Bauder, 1986): areia muito grossa (2 – 1 mm), areia grossa (1 – 0,5 mm), areia média (0,5 – 0,25 mm), areia fina (0,25 – 0,10 mm) e areia muito fina (0,10 – 0,05 mm), correspondendo aos intervalos adotados pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 1975).

Para a determinação da fração argila utilizou-se o método do densímetro (Bouyoucos), enquanto que, o silte foi determinado por diferença. Também se determinou a argila dispersa em água pelo procedimento semelhante ao da análise granulométrica, porém, usando água como solução dispersante e, em seguida, calculou-se o grau de flocculação (Embrapa, 1997).

No caso dos horizontes fortemente cimentados, houve necessidade de um pré-tratamento para quebrar a cimentação. Para tanto, amostras destorroadas e passadas em peneira de 2,0 mm foram submetidas a uma alternância de ataque alcalino e ácido. Para a dissolução no meio básico, 200 ml da solução KOH 2 mol L<sup>-1</sup> foram adicionados a 20 g da amostra em copo de aço-inoxidável. Após fervura por 2,5 min, o material foi esfriado rapidamente e, em seguida, centrifugado para descartar o sobrenadante. A amostra foi transferida para béquer de vidro com a ajuda de uma pisseta com HCl 1,2 mol L<sup>-1</sup>. Para o ataque ácido adicionou-se 200 ml da solução HCl 6 mol L<sup>-1</sup>, aquecendo-se a 70° C, seguindo-se de centrifugação e lavagem com HCl 1,2 mol L<sup>-1</sup> e,

posteriormente, com álcool – sempre usando centrifugação para descartar o sobrenadante.

Após o pré-tratamento, o material do duripã foi submetido à análise granulométrica pelo método da pipeta, usando-se hexametáfosfato de sódio a 0,1 N como solução dispersante associado ao processo de agitação (Embrapa, 1997).

### **3.4 Análise química para caracterização geral**

A metodologia descrita pela Embrapa (1997) foi adotada para a análise química destinada à caracterização geral dos solos, para tanto, a TFSA foi utilizada nas seguintes determinações:

- pH em H<sub>2</sub>O e KCl 1 mol L<sup>-1</sup>, ambos na relação solo/solução de 1/2,5;
- carbono orgânico, por oxidação da matéria orgânica com dicromato de potássio em meio sulfúrico;
- fósforo assimilável extraído pela solução de HCl 0,05 mol L<sup>-1</sup> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 mol L<sup>-1</sup>;
- sódio e potássio trocáveis solubilizados por HCl 0,05 mol L<sup>-1</sup>;
- cálcio, magnésio e alumínio trocáveis extraídos por KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; e
- acidez potencial – H+Al extraídos pela solução tamponada de acetato de cálcio a pH 7,0.

Posteriormente foram calculados o teor de matéria orgânica (MO), a soma das bases (SB), a capacidade de troca de cátions (CTC) e os percentuais de bases (%V) e alumínio trocáveis (%m).

### **3.5 Análise por fluorescência de raios-x**

Determinaram-se os teores totais dos elementos por espectrometria de fluorescência de raios-x (FRX). Para esta análise, optou-se pela metodologia usada por Nardy et al. (1997), obtendo-se discos de 350 mm de diâmetro e 3 mm de espessura através da fusão de 1,2 g da amostra (pulverizada em almofariz de porcelana) com 1,2 g de tetraborato de lítio e 1,2 g de metaborato de lítio. O aparelho empregado consiste num

espectrômetro seqüencial modelo PW 2400 da Philips, com tubo de ródio e potência máxima de 3.000 W.

### **3.6 Ataque sulfúrico**

As amostras de TFSA para esta análise passaram por digestão em  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , diluído na proporção de 1:1, seguindo a descrição de Camargo et al. (1986). O extrato obtido foi utilizado para determinar os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{MnO}$  por espectrofotometria de absorção atômica, de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  por titulação e de  $\text{TiO}_2$  por colorimetria. Após o tratamento com ácido sulfúrico houve um ataque alcalino com  $\text{NaOH}$  (30%) para se determinar o teor de  $\text{SiO}_2$  por gravimetria. Em seguida, baseado em dados dessa determinação, foram calculados os índices  $K_i$  e  $K_r$  que correspondem respectivamente às seguintes relações moleculares  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ .

### **3.7 Extração por oxalato ácido de amônio**

Baseado no procedimento descrito em Ross & Wang (1993), foram misturados 700 ml de  $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  0,2 mol  $\text{L}^{-1}$  e 530 ml de  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0,2 mol  $\text{L}^{-1}$  para se obter a solução a ser usada, a qual teve o pH ajustado (com ácido oxálico) para o valor 3,0. A extração realizou-se no escuro, com três repetições, agitando-se 500 mg de TFSA e 50 ml da solução durante 4 horas. Em seguida o material foi centrifugado, o sobrenadante foi coletado em erlemmeyer de 100 ml e o volume completado com água destilada. O extrato foi, então, armazenado em frascos escuros para determinação dos teores de ferro, silício e alumínio por espectrofotometria de emissão atômica com fonte de plasma (ICP-AES), usando-se um equipamento ELAN 3000 da Perkin Elmer.

### **3.8 Análise mineralógica**

A difratometria de raios-x (DRX) foi utilizada na identificação da composição mineralógica dos solos, seguindo-se metodologia descrita na Embrapa (1997).

Primeiramente, para caracterização geral, realizou-se análise com amostra de TFSA moída em grau de ágata e preparada de forma não orientada, preenchendo-se a janela do porta-amostra sem fazer pressão.

Para identificar os minerais da fração argila foram efetuados pré-tratamentos: (i) eliminando-se a matéria orgânica com uso peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) associado ao aquecimento de  $70^\circ C$  e (ii) removendo-se os óxidos com solução de ditionito-citrato-bicarbonato aquecida entre  $75$  e  $80^\circ C$ . Em seguida, fez-se o fracionamento granulométrico para se trabalhar com a argila, a qual foi analisada sob forma de lâmina orientada sem tratamento (argila natural), saturada com potássio sob temperatura de  $23^\circ C$  (K) e após aquecimento a  $350^\circ C$  (K350) e  $550^\circ C$  (K550).

Para obtenção das curvas de difração de raios-X foi utilizado um equipamento Philips PW 3730 controlado por computador, com goniômetro vertical e radiação de cobre ( $CuK\alpha = 0,154186$  nm), operado nas seguintes condições: potência de 40 kV e corrente de 40 mA; tubo de Cu (radiação  $K\alpha$ ); uso de monocromador para eliminação da radiação  $K\beta$ ; faixa de varredura de  $5^\circ$  a  $90^\circ$  ( $2\theta$ ) para amostra total e  $3^\circ$  a  $65^\circ$  ( $2\theta$ ) para a fração argila; passo respectivamente de  $0,05^\circ$  e  $0,02^\circ$  ( $2\theta$ ), com tempo de acumulação de 1s por passo. No processo de identificação realizou-se a leitura dos picos correspondentes de cada mineral (Jackson, 1969).

### **3.9 Análises por microscopia**

As lâminas delgadas, feitas a partir das amostras indeformadas, foram analisadas e fotografadas usando-se microscópio petrográfico Axioskop Zeiss com câmera acoplada (MC 80). A terminologia geral adotada foi a usada por Bullock et al. (1985), já no caso da distribuição relativa adotou-se a classificação de Stoops & Jongerius (1975) e para a descrição dos constituintes das feições pedológica utilizou-se a denominação de Brewer (1976), porém, para a tradução de alguns termos seguiu-se Lima et al. (1985).

Para avaliar áreas específicas utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura (MEV) Jeol JSM-5600LV, operado com a potência entre 13 e 30 kV e

acoplada a um sistema com microanálise de raios-x por espectrometria de energia dispersiva (EDS). Utilizaram-se amostras de torrão e lâminas delgadas, as quais foram recobertas com carbono ou metalizadas com a liga ouro-paládio e, assim, foram obtidas imagens, realizadas análises pontuais e mapeamentos de alguns elementos.

### **3.10 Laboratórios**

As análises com microscopia eletrônica e difratometria de raios-x foram realizadas nos laboratórios do Núcleo de Pesquisa em Geoquímica e Geofísica da Litosfera (NUPEGEL/ESALQ/USP). Para o Laboratório de Geoquímica do Departamento de Petrologia e Metalogenia da Unesp – Rio Claro foram encaminhadas as amostras submetidas à fluorescência por raios-x. As demais análises foram executadas nos laboratórios do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Atributos morfológicos**

O primeiro perfil do estudo (P0) está inserido na parte mais elevada da toposseqüência (Figura 1C), próximo da extremidade de uma área de relevo plano com aspecto geomorfológico tabular. No perfil P0 (Figura 2), o horizonte mineral rico em matéria orgânica (Ap) tem a espessura de 27 cm. Abaixo do Ap já se encontra material extremamente cimentado, de ocorrência dominante, constituído por grandes blocos (> 10 cm) irregulares de duripãs separados por material friável e originando um horizonte intermediário B/A (27 - 45 cm). A partir dos 45 cm, o duripã ocorre cimentado numa feição praticamente contínua, separado somente por algumas rachaduras. Entre 45 e 60 cm, o duripã (Btm1) apresenta-se bruno-amarelado-claro, com abundantes mosqueados proeminentes – avermelhados e amarelados (Apêndice 1). No horizonte seguinte (Btm2), o duripã aparece mais claro (cinzento-claro), ultrapassa a profundidade de 200 cm e apresenta poucos mosqueados bruno-amarelados. Neste perfil, encontra-se uma grande rachadura (“língua”) preenchida por material friável, sendo que, até a profundidade de 90 cm o material é semelhante ao do horizonte superficial (Ap), então se coletou uma amostra da parte inferior da “língua” (90-130 cm) para ser analisada, na qual observa-se pouco fragipã e freqüente duripã com tamanho de até 3 cm.

No perfil P1 (Figura 3), a camada superficial apresenta os horizontes Ap (0 - 15 cm) e AB (15 - 27 cm). Embora alguns blocos de duripã já estejam inseridos na transição BA (27 a 48 cm), o horizonte cimentado de forma contínua (Btmc) ocorre entre 48 e 59 cm de profundidade, o qual possui coloração variegada (Apêndice 1) e apresenta uma banda ferruginosa no topo. Na seqüência, predominam os horizontes com

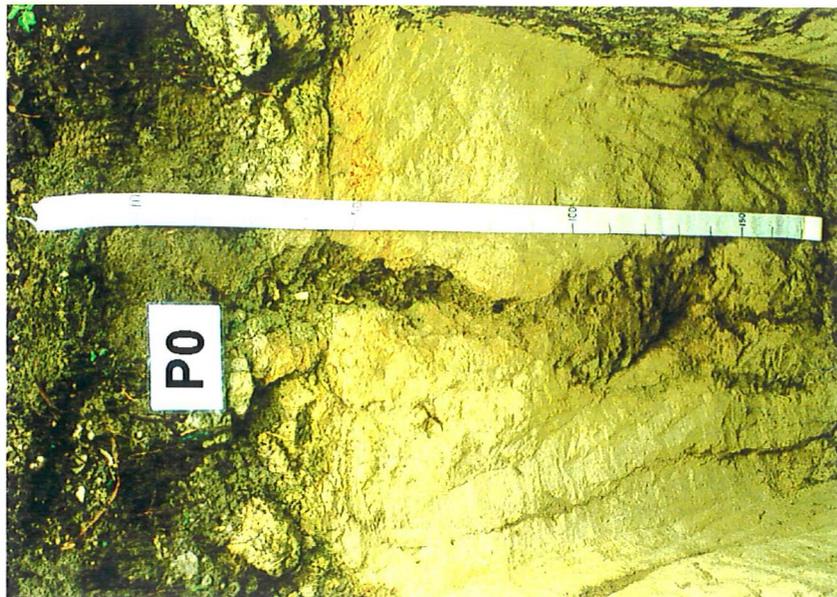


Figura 2— Foto do perfil P0 - Argissolo Acinzentado  
 Distrófico duripânico (PACd): Ap (0 - 27 cm),  
 B/A (27 - 45 cm), Btm1 (45 - 60 cm), Btm2 (0 -  
 200 cm+) e língua até 130 cm.

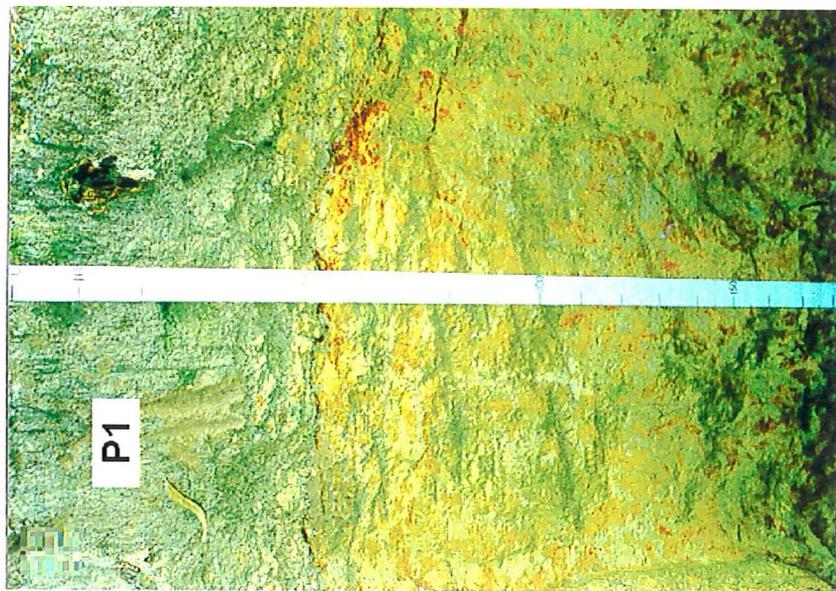


Figura 3 - Foto parcial do perfil P1 - Argissolo Amarelo  
 Distrófico duripânico (PAd1): Ap (0-15 cm), AB  
 (15-27 cm), BA (27-48 cm), Btmc (48-59 cm),  
 Btm (59-90 cm), Btmx (90-160 cm), Btx (160-230  
 cm) e Bt (230-360 cm+).

cores variegadas, sendo o Btm (59 - 90 cm) constituído por blocos de duripãs intercalados por pouca massa de material friável. Na profundidade de 90 a 160 cm ocorre uma cimentação menos pronunciada (Btmx), caracterizando a ocorrência freqüente de fragipãs, porém há muito pouco (< 5%) blocos pequenos (com até 1 cm) de duripã. Nos horizontes subjacentes, Btx (160 - 230 cm) e Bt (230 - 360 cm+), não são observados materiais fortemente cimentados, embora haja muito pouco fragipãs com tamanhos inferiores a 1 cm no Btx.

Abaixo dos horizontes Ap (0 - 18 cm) e AB (18 - 46 cm) do perfil P2 (Figura 4), o matiz dominante continua sendo 2,5 Y, no entanto, aparecem diferentes cores de mosqueados abundantes (Apêndice 1), além de coloração variegada no Btmx. O material cimentado do tipo fragipã é encontrado freqüentemente no BA (46 - 66 cm). Volumes de fragipãs também fazem parte dos dois horizontes inferiores, Btmx (66 - 118 cm) e Btx (118 - 162 cm), mas, concomitantemente, há ocorrência de duripãs no Btmx. Porém, ressalta-se que as estruturas cimentadas são maiores e aparecem com maior freqüência no Btmx1 do que no BA e Btx. A última camada analisada não apresenta essas cimentações, sendo caracterizado como Bt e está na profundidade 118 a 196 cm+.

Duripãs não são encontrados no P3 (Figura 5), perfil que apresenta uma seqüência de horizontes Ap (0 - 17 cm), AB (17 - 29 cm) e BA (29 - 41 cm) sobre uma camada, de 41 a 60 cm de profundidade (Btf), com concentrações de ferro de forma bandada. Nesse horizonte (Btf), com matiz 2,5 Y, observam-se plintitas que aparentemente estão em dissolução e caracterizam a ocorrência de mosqueado abundante e proeminente com cores bem avermelhadas (Apêndice 1). Abaixo dessa seção encontra-se o Bt (60 - 126 cm) de matriz amarelo-brunada e presença comum de mosqueado bruno-forte. Nos dois últimos horizontes, Btx1 (126 - 150 cm) e Btx2 (150 - 215 cm+), o matiz dominante (10 YR) fica mais amarelado (2,5 Y), no entanto, em ambos são encontrados abundantes e variados mosqueados, assim como fragipãs.

As cimentações do tipo fragipã e duripã não aparecem nos três últimos perfis da toposseqüência (P4, P5 e P6), por outro lado, a morfologia indica que as concentrações de ferro sofrem incrementos.

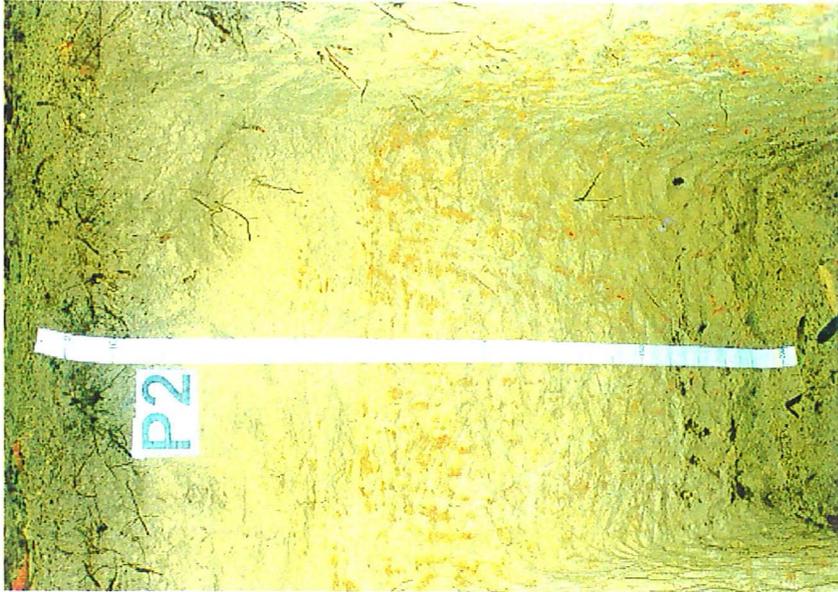


Figura 4 – Foto do perfil P2 - Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico (PAd2): Ap (0–18 cm), AB (18–46 cm), BA (46–66 cm), Btmx (66/118 cm) e Btx (118–162 cm), Bt (118-196 cm+).



Figura 5 - Foto do perfil P3 - Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico plíntico (PAd3): Ap (0–17 cm), AB (17–29 cm), BA (29–41 cm), Btf (41-60 cm), Bt (60–126 cm), Btx1 (126–150 cm) e Btx2 (150–215 cm+).

No perfil P4, que pode ser visualizado na Figura 6, os horizontes Ap (0 – 15 cm) e BA (15 – 34 cm) estão acima da zona mosqueada. O aparecimento de manchas concentradas de ferro, que estão caracterizando o mosqueado abundante de cor vermelha (Apêndice 1), inicia no Bt1 (34 – 67 cm) que apresenta uma matriz amarelada. Nas zonas subjacentes, pode-se observar uma coloração variegada, tanto no Bt2 (67 – 108 cm), como nos demais horizontes subjacentes que apresentam plintita Btf1 (108 – 145 cm) e Btf2 (145 – 190 cm+).

Abaixo do horizonte superficial Ap (0 - 28 cm) já se inicia o aparecimento de mosqueado no perfil P5 (Figura 7), na transição BA (28 – 49 cm). A presença de mosqueado comum no Bt1 (49 – 79 cm) passa a ser abundante no Bt2 (79 – 117 cm) e a apresentar cores mais avermelhadas (2,5YR), como pode ser visto na Figura 7 e no Apêndice 1. A coloração variegada aparece no Btf (117 – 182 cm), onde é identificada a ocorrência de plintita, e se estende até o Btc (182 – 210 cm+). Nesta última camada, as concentrações de ferro estão endurecidas na forma de petroplintita e em quantidade muito freqüente.

Os nódulos de ferro aparecem de forma muito freqüente no primeiro horizonte (Apc: 0 - 23 cm) do perfil P6 (Figura 8). Na transição BAc (23 - 44 cm) as freqüentes petroplintitas estão distribuídas na matriz bruno-amarelada (Apêndice 1) em menor proporção do que na zona sobrejacente. Nos horizontes Btcf1 (44 – 145 cm) e Btcf2 (145 – 220 cm+) a coloração é variegada e ocorrem plintitas e petroplintitas (freqüentes).

Com base nesses atributos morfológicos, que estão mais detalhados no Apêndice 1, e nos resultados das análises de laboratório que serão expostos na seqüência (Tabelas 3, 4 e 6), procurou-se enquadrar os solos no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 1999). Na grafia dos nomes das classes dos solos, até o 2º. nível categórico (subordem), adotou-se a padronização sugerida no Boletim Informativo (SBCS, 2001).

O perfil P0 foi classificado como Argissolo Acinzentado Distrófico duripânico (PACd). Observa-se no sistema brasileiro (Embrapa, 1999) que, embora o caráter duripânico seja designativo para o 4º. nível categórico dos Espodosolos, isso não ocorre



Figura 6 – Foto do perfil P4 - Argissolo Amarelo Distrófico plíntico (PA<sub>d</sub>4): Ap (0–15 cm), BA (15–34 cm), Bt1 (34–67 cm), Bt2 (67–108 cm), Btfl (108–145 cm) e Btf2 (145–190 cm+).



Figura 7 - Foto parcial do perfil P5 - Argissolo Amarelo Distrófico plíntico (PA<sub>d</sub>5): Ap (0-28 cm), BA (28–49 cm), Bt1 (49–79 cm), Bt2 (79–117 cm), Btf (117–182 cm) e Btc (182–210 cm+).

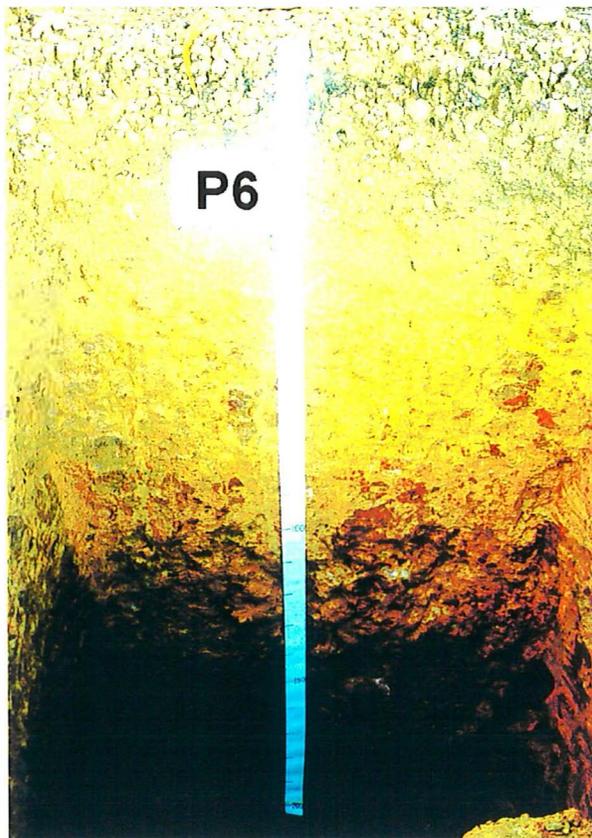


Figura 8 - Foto parcial do perfil P6 - Plintossolo Pétrico Concrecionário Distrófico típico (FFcd): Apc (0-23 cm), BA<sub>c</sub> (23-44 cm), Btcf<sub>1</sub> (44-145 cm) e Btcf<sub>2</sub> (145-220 cm+).

na classe dos Argissolos. No entanto, devido à forte expressão do duripã no perfil, acredita-se que esse atributo não deva ficar fora do subgrupo (4º. nível), podendo, inclusive, ser enquadrado entre os grandes grupos (3º. nível), pois neste solo os blocos de duripãs são dominantes (>80%) próximo à superfície (Tabela 2) e aparecem de forma praticamente contínua a 45 cm de profundidade.

No caso do P1, o solo foi classificado como Argissolo Amarelo Distrófico duripânico (PAd1). Como se pode observar, o caráter duripânico também foi inserido à classe dos Argissolos Amarelos, pois uma camada contínua extremamente cimentada

(Btmc), onde o duripã está em quantidade dominante (Tabela 2), ocorre a 48 cm da superfície, permitindo comentários semelhantes ao do perfil anterior (PACd).

Tabela 2. Ocorrência de duripãs e fragipãs nos horizontes dos perfis com cimentação.

Perfil P0: PACd <sup>(1)</sup>		Perfil P1: PAd1		Perfil P2: PAd2		Perfil P3: PAd3	
Hor/Prof (cm)	Cim <sup>(2)</sup> /Ocor. <sup>(3)</sup>	Hor/Prof (cm)	Cim/Ocor.	Hor/Prof (cm)	Cim/Ocor.	Hor/Prof (cm)	Cim/Ocor.
Ap 0-27	nd	Ap 0-15	nd	Ap 0-18	nd	Ap 0-17	nd
B/A 27-45	D: dm	AB 15-27	nd	AB 18-46	nd	AB 17-29	nd
Btm1 45-60	D: dm e cnt	BA 27-48	D: pc	BA 46-66	F: fr	BA 29-41	nd
Btm2 60-200+	D: dm e cnt	Btmc 48-59	D: dm e cnt	Btmx 66-118	D: pc F: fr	Btf 41-60	nd
Ling 90-130	D: fr F: pc	Btm 59-90	D: dm	Btx 118-162	F: mp	Bt 60-126	nd
		Btmx 90-160	D: mp F: fr	Bt 162-196+	nd	Btx1 126-150	F: fr
		Btx 160-230	F: mp			Btx2 150-215+	F: pc
		Bt 230-360+	nd				

<sup>(1)</sup> PACd - Argissolo Acinzentado Distrófico duripânico; PAd1 - Argissolo Amarelo Distrófico duripânico; PAd2 - Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico; PAd3 - Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico plíntico. <sup>(2)</sup> Cim - cimentação com D: duripã e F: fragipã. <sup>(3)</sup> Ocor – ocorrência: nd – não detectado, mp – muito pouco (<5% do volume), pc – pouco (5 a 15%), f – freqüente (15 a 40%), d – dominante (>80%) e cnt – camada contínua, separada por rachaduras.

O perfil P2 foi enquadrado como Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico (PAd2). Embora haja duripã no Btmx (66-118 cm), observa-se que a quantidade é pouca. No entanto, o fragipã é encontrado freqüentemente entre 46 e 118 cm de profundidade, nos horizontes BA e Btmx (Tabela 2).

O solo do perfil P3 foi classificado como Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico plíntico (PAd3), pois, além das plintitas que ocorrem próximo da superfície (41-60 cm), existem fragipãs a partir dos 126 cm de profundidade. As concentrações dos óxidos de ferro aparecem, principalmente como hematita, de forma bandada (Figura 5), porém, como não há ambiente favorável à formação podem estar relacionadas com condições pretéritas e, atualmente, passando por processo de dissolução, como descrito por Duarte et al. (2000) e Melo et al. (2002a).

Argissolo Amarelo Distrófico plíntico (PAd4) foi a classe que o perfil P4 se enquadrou, no entanto a plintita ocorre em profundidades superiores a 108 cm, tornando-se mais intensa no último horizonte do perfil (Btf2), como pode ser visto na Figura 6.

As características do perfil P5 fizeram com que este solo também fosse classificado como Argissolo Amarelo Distrófico plíntico (PAd5), sendo que as plintitas são encontradas no horizonte Btf entre 117 e 182 cm de profundidade.

O perfil P6, com grande ocorrência de petroplintitas em todos os horizontes e plintitas no Btf1 e Btf2, foi classificado como Plintossolo Pétrico Concrecionário Distrófico típico (FFcd).

A grande presença de plintitas e petroplintitas talvez explique a diferença nos teores de Fe entre áreas supridoras de material para a Fm. Barreiras e os sedimentos que a constituem, indicando uma desferrificação local após a deposição. Porém, também é possível que o material já tenha sofrido desferrificado “in situ”, antes dos processos de erosão que levaram os sedimentos para os depósitos da Fm. Barreiras (UFV, 1984).

Com o enquadramento dos solos nas classes do Sistema Brasileiro (Embrapa, 1999), os perfis P0, P1, P2, P3 P4, P5 e P6 passarão a ser identificados respectivamente pela nomenclatura PACd, PAd1, PAd2, PAd3, PAd4, PAd5 e FFcd.

Como mostra a classificação dos solos, os Argissolos são predominantes na seqüência estudada. No entanto, Jacomine (1996) indica que os Latossolos Amarelos ocupam a maior área dos Tabuleiros Costeiros no Estado da Bahia, cobrindo aproximadamente 25.510 km<sup>2</sup>, já os Argissolos Amarelos cobrem 10.250 km<sup>2</sup>. Os Argissolos Acinzentados, Plintossolos e outras classes de solos também ocorrem

distribuídas pelo território dos Tabuleiros, porém com menor representatividade (Ribeiro, 1996; Ribeiro, 1998 e Araújo Filho et al., 2001).

Embora os últimos perfis possam estar relacionados com a topografia atual, onde os solos das posições mais baixas apresentam horizontes com acumulações de ferro, observa-se que os primeiros perfis devem ter sido formados em condições de relevo bem diferente.

Alguns trabalhos têm mostrado que os solos dos Tabuleiros Costeiros que apresentam cimentação do tipo fragipã e duripã estão nas depressões, em áreas associadas a problemas de drenagem (Boulet et al., 1998; Carvalho, 2001; Demattê et al., 1996; Filizola et al., 2001; Jacomine, 1974; Ucha et al., 2002).

As condições hidráulicas do ambiente são determinantes no processo de cimentação e endurecimento. A existência de lençol freático temporário e posterior processo de secagem favorecem a formação de pontes de argilas (Lamotte et al., 1997a, b), assim como a dissolução e precipitação de sílica (Chadwick et al., 1987a e Franzmeier et al., 1989).

Entretanto, nos ambientes que sofreram alterações de relevo, o aparecimento dos horizontes cimentados pode acarretar diferenciação na evolução da pedofoma (relevo), pois, devido à cimentação, são mais resistentes à erosão. Assim sendo, áreas rebaixadas que originaram camadas endurecidas podem, atualmente, ser encontradas nas elevações, como descrito por Aref (2003). Nos solos e duripãs poligenéticos estudados em Idaho (EUA), Blank et al. (1998) relatam que os solos previamente formados também foram completamente erodidos durante o período glacial, entretanto, isto não ocorreu nos horizontes cimentados.

Portanto, os duripãs e fragipãs da área de estudo também podem ter sido originados numa condição onde havia depressão fechada, ocasionando um ambiente de hidromorfismo no período mais úmido. Não é necessário que a depressão seja muito intensa, pois, como a incidência de linhas de drenagem nos tabuleiros geralmente é muito baixa (UFV, 1984), suaves depressões já podem apresentar significantes diferenças na retenção de água.

Posteriormente ao ambiente hidromórfico, processos erosivos, que podem ter sido influenciados pela tectônica, modelaram o relevo atual permitindo o aparecimento dos horizontes cimentados. Então, estas camadas com cimentação ficaram localizadas próximas à superfície, naqueles perfis a montante da toposseqüência, não existindo mais o ambiente de drenagem fechada. Modelos que procuram explicar esse tipo de evolução de solos, inclusive envolvendo área com afloramento de duripã, foram propostos por Ucha (2000) para áreas dos Tabuleiros Costeiros que também estão inseridas no Litoral Norte da Bahia.

## 4.2 Análise física

Com os dados da análise granulométrica na Tabela 3, pode-se observar que os solos desta toposseqüência se originaram principalmente de material com granulação fina. No entanto, esta característica é bastante diversificada nos solos dos Tabuleiros Costeiros, pois os sedimentos da Formação Barreiras distribuídos nas áreas próximas do litoral brasileiro apresentam textura bastante variada e, segundo Vilas Boas (1996), até mesmo no Estado da Bahia este material tem granulometria que oscilando de argilosa a cascalhenta.

Os horizontes superficiais dos solos estudados apresentam-se com maiores teores de areia em relação às camadas subsuperficiais, que são mais argilosas (Tabela 3). Com essa diferenciação os perfis apresentam os seguintes valores de relação textural: PACd = 2,88; PAd1 = 2,58; PAd2 = 1,86; PAd3 = 1,94; PAd4 = 1,83; PAd5 = 2,17 e FFcd = 2,60. Nestas condições, todos os solos são caracterizados pela presença do horizonte diagnóstico B textural. A existência dos gradientes texturais pode ter sido ocasionado por diferentes processos: eluviação, neoformação de argila, erosão diferenciada e intemperização intensa com destruição dos filossilicatos das camadas superficiais.

O processo de destruição das argilas pode ser assumido levando-se em consideração: (i) que os horizontes superficiais estão mais sujeitos às ações intempéricas, (ii) que o ambiente está sob clima quente e úmido e, ainda, (iii) que a

Tabela 3. Caracterização física dos solos estudados.

Hor	Prof	Areia <sup>(1)</sup>						Silte	Argila		Flocu lação	Classe <sup>(3)</sup> Textural	Relação silte/arg
		MG	G	M	F	MF	Total		Total	Água <sup>(2)</sup>			
cm		g kg <sup>-1</sup>								%			
<b>P0: Argissolo Acinzentado Distrófico duripânico – PACd</b>													
Ap	0-27	70	140	240	280	70	800	40	160	60	63	fr-ar.	0,25
B/A	27-45	120	190	130	140	30	610	80	310	00	100	fr-arg.ar.	0,26
Btm1	45-60	40	120	110	110	50	430	30	540	00	100	arg.	0,06
Btm2	60-200+	30	170	130	90	30	450	20	530	00	100	arg.	0,04
Ling	60-130	60	100	120	120	40	440	40	520	260	50	arg.	0,08
<b>P1: Argissolo Amarelo Distrófico duripânico – PAD1</b>													
Ap	0-15	60	140	220	280	60	760	60	180	60	67	fr-ar.	0,33
AB	15-27	90	130	220	270	50	760	20	220	140	36	fr-arg.ar.	0,09
BA	27-48	20	110	150	190	80	550	40	410	160	61	arg.ar.	0,10
Btmc	48-59	20	130	140	130	60	480	40	480	00	100	arg.ar.	0,08
Btm	59-90	30	140	130	100	30	430	40	530	00	100	arg.	0,08
Btmx	90-160	40	70	90	90	50	340	20	640	100	84	m.arg.	0,03
Btx	160-230	50	60	80	80	30	300	20	680	00	100	m.arg.	0,03
Bt	230-360+	20	80	100	110	50	360	20	620	00	100	m.arg.	0,03
<b>P2: Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico – PAD2</b>													
Ap	0-18	80	150	210	220	60	720	20	260	140	46	fr-arg.ar.	0,08
AB	18-46	110	110	150	210	60	640	40	320	80	75	fr-arg.ar.	0,13
BA	46-66	50	80	110	130	50	420	60	520	280	46	arg.	0,12
Btmx	66-118	50	90	90	110	60	400	40	560	200	62	arg.	0,07
Btx	118-162	40	50	70	80	40	280	40	680	120	82	m.arg.	0,06
Bt	162-196+	40	60	80	80	40	300	40	660	40	94	m.arg.	0,06
<b>P3: Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico plântico – PAD3</b>													
Ap	0-17	50	100	210	300	60	720	40	240	140	42	fr-arg.ar.	0,17
AB	17-29	60	90	200	270	60	680	40	280	200	29	fr-arg.ar.	0,14
BA	29-41	60	70	160	230	40	560	40	400	120	70	arg.ar.	0,10
Btf	41-60	30	60	120	150	50	410	60	530	340	35	arg.	0,11
Bt	60-126	50	60	90	120	40	360	60	580	280	52	arg.	0,10
Btx1	126-150	60	110	120	110	40	440	60	500	00	100	arg.	0,12
Btx2	150-215+	30	50	70	70	20	240	40	720	00	100	m.arg.	0,06
<b>P4: Argissolo Amarelo Distrófico plântico – PAD4</b>													
Ap	0-15	40	60	150	230	60	540	40	420	260	38	arg.ar.	0,10
BA	15-34	30	30	50	70	40	220	60	720	340	53	m.arg.	0,08
Bt1	34-67	20	20	30	40	10	120	60	820	140	83	m.arg.	0,07
Bt2	67-108	20	30	60	60	30	200	40	760	60	92	m.arg.	0,05
Btfl	108-145	30	40	70	90	30	260	40	700	00	100	m.arg.	0,06
Btf2	145-190+	40	50	70	90	30	280	40	680	00	100	m.arg.	0,06
<b>P5: Argissolo Amarelo Distrófico plântico – PAD5</b>													
Ap	0-28	80	60	150	270	60	620	80	300	180	40	fr-arg.ar.	0,27
BA	28-49	60	40	70	130	40	340	60	600	400	33	arg.	0,10
Bt1	49-79	40	40	60	80	40	260	40	700	340	51	m.arg.	0,06
Bt2	79-117	40	30	50	70	30	220	40	740	200	73	m.arg.	0,05
Btf	117-182	30	30	40	50	30	180	40	780	60	92	m.arg.	0,05
Btc	182-210+	90	70	80	80	40	360	80	560	00	100	arg.	0,14
<b>P6: Plintossolo Pétrico Concrecionário Distrófico típico – FFcd</b>													
Apc	0-23	290	120	120	140	50	720	80	200	160	20	fr-arg.ar.	0,40
BAc	23-44	140	70	80	110	40	440	80	480	420	13	arg.	0,17
Btcf1	44-145	80	80	100	90	30	380	60	560	00	100	arg.	0,11
Btcf2	145-220+	70	100	130	110	30	440	80	480	00	100	arg.	0,17

<sup>(1)</sup> Areia MG: muito grossa; G: grossa; M: média; F: fina; MF: muito fina; <sup>(2)</sup> Argila dispersa em água; <sup>(3)</sup> Classe Textural: fr-ar.=franco-arenosa; fr-ar.=franco-argilosa; fr-arg.ar.=franco-argiloarenosa; arg.=argilosa; m.arg.=muito argilosa.

vegetação permitiu um grande aporte de matéria orgânica, da qual são liberados ácidos orgânicos.

A diferença no teor de argila, que existe entre o horizonte superficial (A) e o subsuperficial de iluviação (B textural), é encontrada em todos os solos. Com isso, o gradiente textural necessário à classe dos Argissolos, solos dominantes na toposseqüência, é atendido. Embora o perfil P6 tenha sido classificado como Plintossolo (FFcd), também se observa uma elevada relação textural (teor de argila no A / teor de argila no B), no entanto, outras características tiveram precedência para não enquadrá-lo como Argissolo (seção 4.1).

Devido ao elevado grau de intemperismo dos sedimentos da Fm Barreiras, que constituem o material de origem destes solos, é comum encontrar baixos teores de silte, como os determinados nestes perfis (Tabela 3) e em diversos outros solos, tais como os estudados por Duarte et al. (2000), Filizola et al. (2001), Moreau (2001), Ribeiro et al. (1995), Souza et al. (2002).

Com os pequenos teores de silte, observa-se que a relação silte/argila (Tabela 3) apresenta valores extremamente baixos, atingindo índices que satisfazem a condição para solos bem intemperizados ( $< 0,6$  nos horizontes argilosos), como os Latossolos (Embrapa, 1999). No entanto, Oliveira (2001) alerta que este índice está sendo questionado, pois, para os Latossolos, por exemplo, isto foi estabelecido levando-se em consideração os solos desenvolvidos de rochas ácidas.

Segundo Embrapa (1999), fragipã é um horizonte mineral que normalmente apresente textura média, algumas vezes arenosa e raramente argilosa. Já Rhoton & Römken (1998) trabalharam com fragipãs em áreas com aproximadamente 80% de silte. No entanto, os horizontes com fragipãs desta toposseqüência apresentam textura argilosa a muito argilosa (Tabela 3).

A areia é constituída principalmente pelas frações média (0,25-0,50 mm) e fina (0,10-0,25 mm), mas nos horizontes cimentados a fração grossa (0,50-1,0 mm) é bem significativa (Tabela 3). Outros pesquisadores, tais como Melo et al. (2002a), Moreau (2001) e Silva & Ribeiro (1997), que optaram por fazer a subdivisão somente em duas classes, observaram que nos solos dos Tabuleiros Costeiros a predominância é de areia

com tamanho entre 0,2 e 2,0 mm, resultado que também se assemelha com o deste trabalho.

Observa-se que os perfis PAd4 e PAd5, que estão no final da toposseqüência, são os solos que apresentam maiores teores de argila, no entanto, o teor de areia duplica ao se passar do horizonte Btf para o Btc no perfil PAd5 (Tabela 3). Este incremento de areia não está relacionado com descontinuidade litológica, mas é justificado pela grande quantidade de nódulos de ferro que ocorrem no Btc. Além das petroplintitas serem encontradas com tamanhos superiores a 2,0 mm (Apêndice 1), elas também aparecem de forma muito freqüente na fração areia do Btc, como pode ser visto na Figura 9.

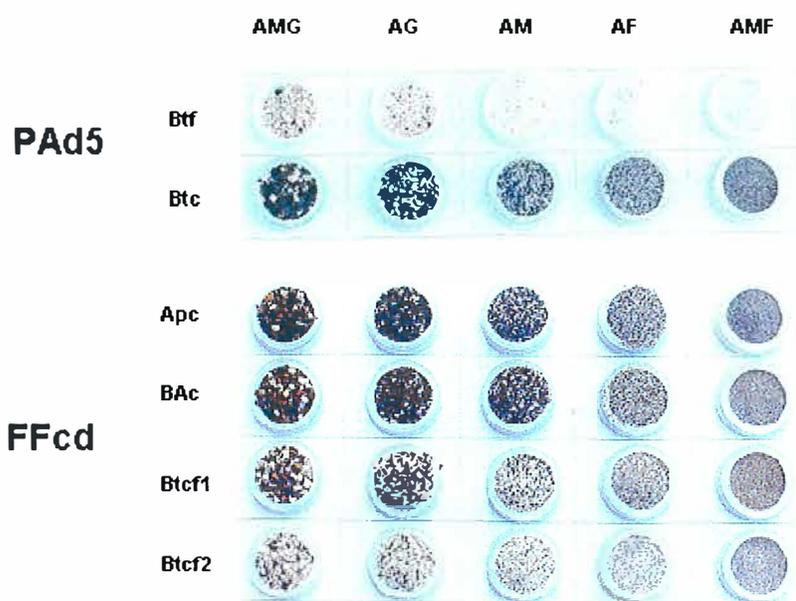


Figura 9 - Fotos dos grãos de areia dos horizontes que apresentam petroplintitas nos perfis PAd5 - Argissolo Amarelo Distrófico plântico e FFcd - Plintossolo Pétrico Concrecionário Distrófico típico. Material separado por peneiramento nas frações: AMG –muito grossa, AG –grossa, AM – média, AF – fina e AMF – muito fina.

No Plintossolo (FFcd) também são encontradas petroplintitas na fração areia. Embora se observe uma tendência de diminuir com a profundidade, esses nódulos estão em quantidade muito freqüente em todos os horizontes do perfil (Figura 9).

Com relação à argila dispersa em água, que é descrita por Ribeiro (2001) como um dos constituintes que apresentam maiores teores nos horizontes coesos dos Tabuleiros, observa-se que há incremento no horizonte de transição (AB e BA) ou no topo do B textural dos perfis sem o caráter duripânico.

Nos horizontes B/A, Btm1 e Btm2 do PACd, Btmc e Btm do PAd1, onde a presença de duripãs é dominante (Tabela 2), a cimentação influi na ausência de argila dispersa em água (Tabela 3). Os demais solos, com exceção do PAd2, também não apresentam argila natural na parte inferior do perfil.

A ocorrência de argila dispersa em água no topo dos perfis, associada a outros fatores, tais como, intensas precipitações pluviais (Tabela 1) e relevo, podem favorecer a translocação e/ou perda de argila por erosão diferenciada, que constituem importantes processos para o aparecimento de diferença textural entre os horizontes superficiais e subsuperficiais (Van Breemen & Buurman, 1998), como observado nos solos desta topossequência.

A presença de argila dispersa em água, assim como de fatores que favoreçam a dispersão, têm sido relacionados com os processos de endurecimento e cimentação dos solos (Attou & Bruand, 1998; James et al., 1995; Lamotte et al., 1997a e Singer et al., 1992).

### **4.3 Análise química de caracterização geral**

Os resultados das determinações químicas expostos na Tabela 4 indicam que, de uma forma geral, os solos são constituídos por materiais bem lixiviados, apresentando baixos teores das bases trocáveis Na, K, Ca e Mg. Embora a drenagem interna de alguns perfis seja prejudicada pelas camadas extremamente cimentadas (duripãs do PACd e

Tabela 4. Caracterização química dos solos estudados.

Hor	Prof cm	pH		MO g kg <sup>-1</sup>	P mg kg <sup>-1</sup>	Complexo Sortivo mmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>						V %	m %		
		H <sub>2</sub> O	KCl			Na	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup> +Al <sup>3+</sup>			SB	T
<b>P0: Argissolo Acinzentado Distrófico duripânico – PACd</b>															
Ap	0-27	4,9	4,1	33	4	0,3	0,5	13	3	8	77	16,8	93,8	18	32
B/A	27-45	5,0	4,2	19	4	0,5	1,1	9	2	11	98	12,6	110,6	11	47
Btm1	45-60	5,2	4,3	11	4	0,5	1,0	2	2	5	51	5,5	56,5	10	48
Btm2	60-200+	4,3	3,9	9	1	0,4	1,0	1	2	14	44	4,5	48,4	9	76
Ling	60-130	5,0	4,3	20	6	0,4	0,6	5	2	25	130	8,0	138,0	6	76
<b>P1: Argissolo Amarelo Distrófico duripânico – PAD1</b>															
Ap	0-15	6,0	5,2	49	5	0,4	0,5	60	10	1	49	70,9	119,9	59	1
AB	15-27	5,4	4,5	18	3	0,3	0,5	18	3	2	35	21,8	56,8	38	8
BA	27-48	5,7	4,5	15	4	0,4	0,6	15	3	7	72	19,2	91,2	21	27
Btmc	48-59	5,2	4,5	10	3	0,3	0,7	4	2	5	63	7,4	70,4	11	40
Btm	59-90	5,1	4,4	8	4	0,3	1,4	7	4	10	59	16,6	75,6	22	38
Btmx	90-160	4,5	3,9	8	4	0,3	0,8	2	3	14	46	6,1	52,1	12	70
Btx	160-230	4,2	3,7	8	2	0,3	0,5	1	3	14	42	4,8	46,8	10	74
Bt	230-360+	4,1	3,6	5	2	0,2	0,5	2	2	14	40	14,7	54,7	27	49
<b>P2: Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico – PAD2</b>															
Ap	0-18	4,5	3,8	23	5	0,4	0,7	5	2	13	63	8,1	71,1	11	62
AB	18-46	4,6	4,0	8	2	0,2	0,6	1	1	11	40	2,8	42,8	7	80
BA	46-66	5,0	4,1	10	2	0,3	1,4	2	2	10	50	5,7	55,7	10	64
Btmx	66-118	4,9	4,1	8	3	0,3	0,5	1	3	11	46	4,8	50,8	9	70
Btx	118-162	4,6	3,9	8	2	0,2	0,5	1	3	14	44	4,7	48,7	10	75
Bt	162-196+	4,4	3,8	8	3	0,2	0,5	1	2	13	39	3,7	42,7	9	78
<b>P3: Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico plântico – PAD3</b>															
Ap	0-17	5,4	4,5	20	5	0,3	0,5	11	5	3	44	20,8	64,8	32	13
AB	17-29	4,6	3,9	13	3	0,3	0,2	5	2	7	40	7,5	47,5	16	48
BA	29-41	4,9	4,1	10	3	0,3	0,3	8	2	6	39	27,6	66,6	41	18
Btf	41-60	5,0	4,2	10	3	0,3	0,8	9	3	4	42	15,1	57,1	26	21
Bt	60-126	5,0	4,3	8	2	0,3	0,8	8	4	5	34	13,1	47,1	28	28
Btx1	126-150	4,9	4,4	8	3	0,3	0,8	6	7	3	34	14,1	48,1	29	18
Btx2	150-215+	4,8	4,2	5	2	0,3	1,0	5	6	6	39	53,3	92,3	58	10
<b>P4: Argissolo Amarelo Distrófico plântico – PAD4</b>															
Ap	0-15	5,1	4,2	31	5	0,4	0,5	16	6	6	54	22,9	76,9	30	21
BA	15-34	4,7	4,0	13	4	0,3	0,4	1	1	14	47	2,7	49,7	5	84
Bt1	34-67	4,6	4,0	8	3	0,2	0,5	2	1	12	40	3,7	43,7	8	76
Bt2	67-108	4,4	4,0	8	2	0,2	0,5	1	1	9	36	2,7	38,7	7	77
Btfl	108-145	4,1	3,9	5	3	0,2	0,4	1	1	9	30	2,6	32,6	8	78
Btfl2	145-190+	4,4	4,1	8	2	0,2	0,3	4	2	9	34	30,5	64,5	47	23
<b>P5: Argissolo Amarelo Distrófico plântico – PAD5</b>															
Ap	0-28	5,5	4,8	26	5	0,5	0,4	28	9	0	43	37,9	80,9	47	0
BA	28-49	4,9	4,2	13	2	0,3	0,5	7	2	7	39	9,8	48,8	20	42
Bt1	49-79	4,9	4,0	8	3	0,3	0,5	4	2	8	45	6,8	51,8	13	54
Bt2	79-117	4,7	4,1	5	3	0,2	0,5	2	2	8	45	4,7	49,7	9	63
Btf	117-182	4,6	4,1	8	3	0,2	0,5	5	3	8	38	8,7	46,7	19	48
Btc	182-210+	4,9	4,1	8	3	0,2	0,5	3	3	9	39	6,7	45,7	15	57
<b>P6: Plintossolo Pétrico Concrecionário Distrófico típico – FFcd</b>															
Apc	0-23	5,4	4,6	36	5	0,4	0,8	40	6	2	60	66,2	126,2	52	3
BAc	23-44	4,9	4,2	15	3	0,3	0,4	6	2	7	39	8,7	47,7	18	45
Btcf1	44-145	4,5	4,0	8	3	0,2	0,4	2	2	9	37	4,6	41,6	11	66
Btcf2	145-220+	4,5	3,8	8	2	0,2	0,4	2	2	16	36	4,6	40,6	11	78

PAd1), o que causa grande impedimento à lixiviação, todos os solos são quimicamente pobres, pois esta caracterização é comum nos Tabuleiros Costeiros devido ao material de origem já ter passado por intensos processos de intemperismo/pedogênese. Estes processos começaram a atuar com o intemperismo das rochas do interior que originaram o material que sedimentou na Formação Barreiras (Ribeiro, 1996 e UFV, 1984).

Por ser uma área de exploração com eucalipto onde se fez calagem, os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  (Tabela 4) apresentam-se mais elevados próximo à superfície. Por outro lado, observa-se uma tendência de encontrar baixos teores de  $\text{Al}^{3+}$  no topo dos perfis, embora isto não seja observado no PAd2 que possui baixos valores de cálcio em todos os horizontes.

Ao se analisar o comportamento do alumínio nos perfis com extrema cimentação, observa-se que a mais alta concentração deste cátion ( $\text{Al}^{3+}$  na Tabela 4) está na “língua”. Devido os horizontes subsuperficiais do PACd serem constituídos por camadas cimentadas de forma quase contínua de duripãs, a drenagem interna deste perfil ocorre praticamente pelas rachaduras (“línguas”), o que permite uma degradação do material cimentado ao longo das fendas e liberação de alumínio que pode ficar retido nos sítios de troca.

O teor de  $\text{Al}^{3+}$  também não é baixo no Btm2 do PACd (Tabela 4) e, embora não atinja o valor da “língua”, também ocasiona uma elevada saturação por alumínio ( $m = 76\%$ ). Apesar deste horizonte ser cimentado de forma contínua, ao se coletar o material para análise, observou-se que o grau de cimentação do Btm2 é inferior ao do Btm1 (Apêndice 1) e, assim, também pode estar havendo alguma liberação de agentes cimentantes.

No perfil PAd1, o Btmc que apresenta cimentação dominante e contínua possui um teor de  $\text{Al}^{3+}$  igual  $5 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ . No horizonte subjacente (Btm), onde a presença de duripã também é dominante, observa-se que esse teor duplica, porém a saturação por alumínio ( $m$ ) é semelhante. No Btmx e Btx, que são horizontes onde a cimentação está mais degradada, os teores de alumínio são mais altos e os valores de  $m$  também estão elevados (Tabelas 2 e 4).

Com os baixos valores da soma de bases (SB), o complexo de troca (valor T) tem pequena contribuição dos cátions básicos e, assim, estes solos ficam caracterizados pelo caráter distrófico ( $V < 50\%$ ), que é uma propriedade comumente encontrada nos solos dos Tabuleiros Costeiros (Jacomine, 1996; Ribeiro, 1996 e UFV, 1984), no entanto, nos solos desta toposequência não se verifica o caráter álico.

Como pode ser visto na Tabela 4, o eutrofismo ocorre somente no Btx2 ( $V = 52\%$ ) do PAd3 e nos horizontes superficiais do PAd1 ( $V = 59\%$ ) e FFcd ( $V = 52\%$ ). Dessa forma, a maioria dos horizontes tem a capacidade de troca de cátions (T) ocupada principalmente pelo  $H^+ + Al^{3+}$ , podendo apresentar uma boa relação com a propriedade ácida (pH) encontrada nesses solos, os quais apresentam pH mais elevado nos horizontes superficial, com exceção para os perfis PACd e o PAd2.

Mesmo com o material de origem já apresentando um elevado grau de intemperismo (Jacomine, 1996; Ribeiro, 1996), estes solos não apresentam valor de pH em KCl maior ou igual ao do pH em água ( $\Delta pH$  positivo ou nulo), comum em solos oxidicos bastante intemperizados. Assim sendo, os colóides destes solos não possuem carga líquida positiva.

Nos perfis estudados o fósforo disponível (P) se encontra com valores baixos, mas se observa que as maiores concentrações estão nos horizontes superiores dos diferentes perfis (Tabela 4).

Embora não se tenha visto discussões envolvendo relações do potássio com horizontes cimentados, observa-se que o íon  $K^+$  (Tabela 4) está mais concentrado nos horizontes que apresentam maior grau de cimentação.

O sódio do complexo de troca ( $Na^+$ ) é encontrado em baixos teores e não segue um padrão de distribuição dentro do perfil (Tabela 4), ora menos concentrado na superfície (PACd), ora com maiores teores no topo do perfil (PAd1, PAd2, PAd4, PAd5 e FFcd) ou, ainda, sem alteração ao longo do perfil (PAd3).

Estes solos não apresentam teores elevados de magnésio (Tabela 4), mas suas maiores concentrações geralmente estão nos horizontes superficiais dos perfis. As últimas camadas do perfil P3 também apresentam concentrações maiores de  $Mg^{2+}$ .

Por estarem numa área explorada com eucalipto, onde há um grande aporte de folhas, observa-se na Tabela 4 que os teores de matéria orgânica (MO) dos horizontes superficiais não são baixos e, como é comum, apresentam uma redução com a profundidade. Estes altos teores de matéria orgânica, no topo dos perfis, podem ter influenciado num maior grau de intemperismo que naturalmente os horizontes superficiais sofrem, contribuindo para um menor teor de argila nessas camadas. No entanto, não se excluem os outros processos mencionados que contribuem para a presença de um gradiente textural, tais como eluviação e erosão diferenciada.

Os ácidos liberados na decomposição da matéria orgânica também devem ter importância no processo de degradação dos duripãs. O elevado teor de matéria orgânica (Tabela 4) determinado na “língua” do perfil PACd indica que, por lixiviação, esses ácidos orgânicos podem atingir maiores profundidades e atuar na desestabilização do material cimentante.

#### **4.4 Análise por fluorescência de raios-x**

Os resultados das determinações por fluorescência de raios-x, que expressam os teores totais dos constituintes do solo na forma de óxidos, são apresentados na Tabela 5. Devido à composição de quartzo na fração grosseira e dos aluminossilicatos na fração fina, os elementos encontrados em maior proporção são o Si e o Al, entretanto, os teores de Fe são elevados nos horizontes concrecionários de alguns solos, como será discutido a seguir.

Na Tabela 5 pode-se observar mudanças bruscas entre os horizontes Ap e B/A do perfil PACd, onde o teor de aproximadamente 90% de  $\text{SiO}_2$  diminui para pouco menos de 60%, por outro lado, o teor inferior a 5% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aumenta para próximo de 25%. Essas alterações estão relacionadas com a mudança textural (Tabela 3), que marca um grande incremento da fração argila nos horizontes subsuperficiais, no entanto, o incremento de alumínio é extremamente elevado.

No perfil PAD1 (Tabela 5) verifica-se que os dois primeiros horizontes (Ap e AB) possuem os maiores teores de  $\text{SiO}_2$  e os menores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , explicados pelos

Tabela 5. Teores totais dos elementos (expressos na forma de óxidos) obtidos por fluorescência de raios-x.

Hor	Prof	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI*	Soma
cm		%											
<b>P0: Argissolo Acinzentado Distrófico duripânico – PACd</b>													
Ap	0-27	89,68	4,55	0,42	0,623	0,006	0,010	0,076	0,057	0,02	0,013	4,58	100,03
B/A	27-45	59,25	24,77	1,35	1,083	0,012	0,078	0,043	0,052	0,06	0,012	13,34	100,05
Btm1	45-60	59,72	25,60	1,54	1,075	0,012	0,053	0,044	0,044	0,06	0,011	11,89	100,05
Btm2	60-200+	59,70	26,18	1,50	1,144	0,013	0,053	0,035	0,053	0,06	0,011	11,32	100,07
Ling	90-130	62,63	22,39	1,34	1,541	0,011	0,044	0,044	0,044	0,05	0,014	11,94	100,05
<b>P1: Argissolo Amarelo Distrófico duripânico – PAD1</b>													
Ap	0-15	84,89	5,56	0,67	0,719	0,007	0,028	0,277	0,065	0,03	0,017	7,76	100,02
AB	15-27	85,69	7,61	0,70	0,788	0,010	0,009	0,085	0,066	0,02	0,010	5,02	100,01
BA	27-48	60,18	23,88	2,28	1,087	0,009	0,044	0,061	0,053	0,04	0,011	12,37	100,01
Btmc	48-59	49,23	25,43	9,49	0,922	0,009	0,048	0,037	0,048	0,05	0,012	14,78	100,06
Btm	59-90	54,96	27,50	3,48	0,984	0,010	0,052	0,035	0,052	0,06	0,010	12,92	100,06
Btmx	90-160	55,30	27,73	3,47	1,239	0,011	0,062	0,035	0,035	0,06	0,010	12,10	100,06
Btx	160-230	60,01	25,37	2,39	1,231	0,013	0,054	0,027	0,054	0,06	0,010	10,81	100,03
Bt	230-360+	63,18	22,59	3,23	1,209	0,015	0,045	0,027	0,054	0,06	0,011	9,80	100,22
<b>P2: Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico – PAD2</b>													
Ap	0-18	84,62	7,78	0,77	0,829	0,008	0,009	0,056	0,056	0,03	0,013	5,85	100,02
AB	18-46	78,54	12,70	1,14	1,124	0,008	0,019	0,028	0,056	0,04	0,009	6,34	100,01
BA	46-66	66,76	20,24	2,08	1,309	0,012	0,036	0,036	0,045	0,05	0,011	9,74	100,31
Btmx	66-118	58,43	26,35	2,27	1,310	0,012	0,044	0,035	0,044	0,07	0,012	11,51	100,08
Btx	118-162	57,14	27,18	2,17	1,392	0,012	0,062	0,026	0,044	0,08	0,011	11,91	100,02
Bt	162-196+	62,21	24,13	1,92	1,301	0,013	0,045	0,027	0,054	0,07	0,011	10,25	100,03
<b>P3: Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico plântico – PAD3</b>													
Ap	0-17	83,87	8,26	1,13	0,982	0,011	0,019	0,076	0,047	0,03	0,013	5,62	100,05
AB	17-29	85,33	9,72	1,28	1,004	0,010	0,010	0,049	0,068	0,03	0,010	2,50	100,01
BA	29-41	74,39	15,15	2,12	1,105	0,010	0,028	0,046	0,056	0,03	0,010	7,12	100,06
Btf	41-60	67,01	19,11	2,94	1,295	0,012	0,045	0,063	0,054	0,05	0,011	9,41	99,99
Bt	60-126	67,65	19,34	2,42	1,263	0,011	0,045	0,055	0,055	0,04	0,011	9,13	100,01
Btx1	126-150	61,20	24,36	2,63	1,110	0,011	0,063	0,045	0,054	0,05	0,011	10,48	100,01
Btx2	150-215+	61,29	24,69	2,04	1,162	0,012	0,063	0,036	0,045	0,05	0,012	10,64	100,04
<b>P4: Argissolo Amarelo Distrófico plântico – PAD4</b>													
Ap	0-15	74,91	13,13	2,44	1,139	0,015	0,037	0,073	0,055	0,05	0,015	8,15	100,01
BA	15-34	59,28	23,64	4,82	1,376	0,013	0,054	0,036	0,071	0,05	0,013	10,67	100,03
Bt1	34-67	53,68	26,44	6,60	1,324	0,011	0,053	0,035	0,044	0,06	0,013	11,76	100,02
Bt2	67-108	58,15	23,83	5,78	1,276	0,014	0,054	0,036	0,054	0,06	0,011	10,74	100,02
Btf1	108-145	58,70	22,25	5,64	1,232	0,011	0,044	0,035	0,044	0,06	0,011	11,97	100,01
Btf2	145-190+	61,42	20,14	7,71	1,197	0,013	0,036	0,036	0,045	0,06	0,011	9,34	100,01
<b>P5: Argissolo Amarelo Distrófico plântico – PAD5</b>													
Ap	0-28	80,68	8,70	1,66	1,044	0,015	0,028	0,139	0,065	0,04	0,017	7,61	100,00
BA	28-49	67,42	18,85	3,34	1,247	0,014	0,036	0,046	0,055	0,05	0,012	8,96	100,03
Bt1	49-79	61,12	22,68	4,05	1,332	0,014	0,054	0,045	0,045	0,05	0,012	10,59	100,00
Bt2	79-117	59,34	24,03	4,50	1,278	0,012	0,054	0,036	0,045	0,05	0,012	10,64	100,01
Btf	117-182	59,39	23,38	4,50	1,233	0,025	0,053	0,035	0,044	0,06	0,012	11,29	100,02
Btc	182-210+	50,41	18,18	20,06	1,025	0,015	0,045	0,036	0,045	0,07	0,020	10,11	100,02
<b>P6: Plintossolo Pétrico Concrecionário Distrófico típico – FFcd</b>													
Apc	0-23	69,41	11,33	7,46	1,075	0,016	0,036	0,152	0,054	0,04	0,023	10,40	100,00
BAC	23-44	55,42	21,20	11,44	1,244	0,013	0,045	0,045	0,054	0,06	0,019	10,49	100,03
Btcf1	44-145	55,25	22,91	9,81	1,216	0,013	0,063	0,036	0,045	0,09	0,016	10,56	100,01
Btcf2	145-220+	69,75	13,63	8,78	0,801	0,011	0,028	0,037	0,047	0,10	0,014	6,81	100,02

\* Perda ao fogo.

elevados teores de areia (Tabela 3). A partir do horizonte BA, onde os teores de argila estão mais elevados, o  $Al_2O_3$  apresenta-se alto, mas destaca-se o grande incremento de Fe no Btmc, camada que possui uma couraça ferruginosa.

No perfil PAd2, embora os teores de  $Al_2O_3$  sejam bastante elevados a partir do Btmx, as mudanças mais gradativas. Nos demais solos, observa-se ainda que as alterações nos teores de silício e alumínio ocorrem de forma menos brusca (Tabela 5). Também é a jusante da toposseqüência, como já descrito na *seção 4.2*, que os maiores teores da fração argila são encontrados (PAd4 e PAd5), mas somente o Bt1 do PAd4 apresenta concentração de alumínio superior a 25%. Por outro lado, as concentrações mais elevadas de  $Al_2O_3$  (> 25%) estão nos solos localizados no topo da vertente (PACd, PAd1 e PAd2), especificamente nas camadas cimentadas.

Analisando-se o comportamento do  $Fe_2O_3$ , pode-se perceber que os teores são menores nas camadas superficiais, mas destaca-se o acúmulo de ferro no Btmc do PAd1, onde há uma couraça ferruginosa. Também se observam significativos incrementos de  $Fe_2O_3$  nos horizontes subsuperficiais do PAd4 e PAd5 que estão a jusante da toposseqüência, além dos teores mais elevados nas camadas concrecionárias do FFcd e Btc do PAd5.

Os teores de CaO e MgO são baixos, indicando que não há influência de carbonatos na cimentação destes duripãs, como ocorre em regiões com outras condições climáticas em diversos países (Blank et al., 1998; Eash & Sandor, 1995; James et al., 2000; Nash & Shaw, 1998; Sullivan & Koppi, 1995) e até mesmo no semi-árido brasileiro (Brasil, 1972; Brasil, 1973a; Brasil, 1973b; Silva et al., 1993).

#### **4.5 Análise pelo ataque sulfúrico**

Os resultados com os teores de silício, alumínio, ferro, titânio e manganês, determinados após o ataque sulfúrico, se encontram na Tabela 6. Analisando-se o comportamento dos constituintes, observa-se que geralmente os menores teores são encontrados na camada superficial, no entanto, existem algumas exceções e particularidades que serão discutidas a seguir.

Tabela 6. Teores de Si, Al, Fe, Ti e Mn (expressos na forma de óxidos) extraídos por ataque sulfúrico e índices Ki e Kr.

Hor	Prof	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	Ki	Kr	
	cm	----- g kg <sup>-1</sup> -----							
<b>P0: Argissolo Acinzentado Distrófico duripânico – PACd</b>									
Ap	0-27	31,0	43,9	3,4	3,0	< 0,1	1,20	1,14	
B/A	27-45	278,0	229,0	10,1	6,4	< 0,1	2,06	2,01	
Btm1	45-60	271,0	243,2	12,8	6,7	< 0,1	1,89	1,83	
Btm2	60-200+	262,0	239,2	11,1	6,9	< 0,1	1,86	1,81	
Ling	90-130	239,0	212,6	12,1	9,1	< 0,1	1,91	1,84	
<b>P1: Argissolo Amarelo Distrófico duripânico – PAD1</b>									
Ap	0-15	57,0	58,6	6,2	4,1	< 0,1	1,65	1,55	
AB	15-27	75,0	91,3	8,4	5,1	< 0,1	1,40	1,32	
BA	27-48	162,0	193,8	19,3	6,0	< 0,1	1,42	1,32	
Btmc	48-59	242,0	256,5	43,7	7,1	< 0,1	1,60	1,48	
Btm	59-90	281,0	269,8	33,6	7,0	< 0,1	1,77	1,66	
Btmx	90-160	265,0	268,7	29,3	8,0	< 0,1	1,54	1,45	
Btx	160-230	262,0	262,1	25,3	8,3	< 0,1	1,70	1,61	
Bt	230-360+	246,0	240,2	28,2	8,1	< 0,1	1,74	1,62	
<b>P2: Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico – PAD2</b>									
Ap	0-18	81,0	91,3	7,9	4,9	< 0,1	1,49	1,41	
AB	18-46	123,0	140,7	11,4	5,9	< 0,1	1,49	1,41	
BA	46-66	199,0	218,2	18,7	8,1	< 0,1	1,55	1,47	
Btmx	66-118	272,0	273,3	21,3	8,6	< 0,1	1,69	1,61	
Btx	118-162	284,0	272,8	19,8	9,2	< 0,1	1,77	1,69	
Bt	162-196+	255,0	250,9	18,8	9,1	< 0,1	1,73	1,65	
<b>P3: Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico plíntico – PAD3</b>									
Ap	0-17	91,0	89,2	10,2	5,4	< 0,1	1,73	1,62	
AB	17-29	109,0	112,2	12,7	5,6	< 0,1	1,65	1,54	
BA	29-41	161,0	152,0	18,7	7,1	< 0,1	1,80	1,67	
Btf	41-60	184,0	193,7	29,3	7,8	< 0,1	1,61	1,47	
Bt	60-126	206,0	218,2	24,0	8,1	< 0,1	1,60	1,50	
Btx1	126-150	273,0	251,0	23,7	7,9	< 0,1	1,85	1,74	
Btx2	150-215+	329,0	256,5	18,2	8,0	< 0,1	2,18	2,09	
<b>P4: Argissolo Amarelo Distrófico plíntico – PAD4</b>									
Ap	0-15	59,0	135,6	22,5	6,5	< 0,1	1,99	1,80	
BA	15-34	279,0	247,8	51,8	11,5	< 0,1	1,91	1,69	
Bt1	34-67	288,0	267,7	70,3	12,0	< 0,1	1,83	1,57	
Bt2	67-108	249,0	250,9	67,3	11,4	< 0,1	1,69	1,44	
Btf1	108-145	237,0	239,2	68,6	11,8	< 0,1	1,68	1,42	
Btf2	145-190+	214,0	207,0	99,4	11,0	< 0,1	1,76	1,34	
<b>P5: Argissolo Amarelo Distrófico plíntico – PAD5</b>									
Ap	0-28	94,0	92,3	15,0	7,2	< 0,1	1,73	1,57	
BA	28-49	212,0	211,6	39,1	10,1	< 0,1	1,70	1,52	
Bt1	49-79	216,0	229,0	40,1	10,6	< 0,1	1,60	1,44	
Bt2	79-117	285,0	256,5	51,3	10,9	< 0,1	1,89	1,67	
Btf	117-182	263,0	255,4	49,4	10,8	< 0,1	1,75	1,56	
Btc	182-210+	233,0	223,3	107,3	10,4	< 0,1	1,77	1,36	
<b>P6: Plintossolo Pétrico Concrecionário Distrófico típico – FFd</b>									
Apc	0-23	119,0	116,8	184,4	11,9	< 0,1	1,73	0,86	
BAc	23-44	188,0	205,0	144,0	10,7	< 0,1	1,56	1,08	
Btcf1	44-145	249,0	218,2	124,3	11,7	< 0,1	1,94	1,42	
Btcf2	145-220+	168,0	152,0	104,4	8,9	< 0,1	1,88	1,31	

Levando-se em consideração todo o material da toposseqüência, pode-se perceber que os mais baixos valores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  estão no horizonte Ap do perfil PACd (Tabela 6), onde a argila também ocorre em menor quantidade (Tabela 3).

A mudança entre os horizontes Ap e B/A do PACd é muito acentuada, pois o teor de Si passa de 31,0 para 278,0  $\text{g kg}^{-1}$  e, de forma semelhante, o teor de Al se altera de 43,9 para 229,0  $\text{g kg}^{-1}$  (Tabela 6). Após esses aumentos que acompanham o incremento de argila, os teores se mantêm praticamente constante, como podem ser visualizados na Figura 10. Também pode ser observado que o teor de Al é mais alto do que o de Si no horizonte Ap, fato que se inverte nas camadas cimentadas e no material da “língua” (Tabela 6).

No perfil PAd1, verifica-se que os teores mais baixos de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  estão no topo do perfil, enquanto que os maiores valores ocorrem na camada cimentada Btm (Tabela 6), sendo que os incrementos neste solo são mais gradativos devido aos horizontes transicionais AB e BA. Na Figura 10 pode-se observar que as curvas com a distribuição de Si e Al (em função da profundidade) apresentam comportamento semelhante ao da argila, porém, nos horizontes com cimentação ocorrem diferenciações que indicam maiores proporções de Si e Al. O teor de  $\text{SiO}_2$  está mais elevado do que o de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  no Btm, contudo, ocorre o inverso no Btmc, que é um horizonte onde o duripã também está de forma dominante (Tabela 2), porém, associado à presença de petroplintitas (couraça ferruginosa).

A partir do horizonte superficial (Ap) do PAd2, verificam-se incrementos nos teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  até os horizontes com cimentação (Btmx e Btx), onde estão as maiores concentrações e, em seguida, no Bt ocorre uma pequena redução (Tabela 6). A Figura 10 mostra que as curvas com os teores de Si e Al têm comportamento semelhante ao da distribuição de argila dentro do perfil, embora se perceba um distanciamento na profundidade do Btmx.

No caso do perfil PAd3, observa-se que os incrementos de silício e alumínio vão até o último horizonte – Btx2 (Tabela 6). Até mesmo no horizonte Btx1, onde ocorreu uma redução de argila, houve aumento de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , com isso, as curvas de

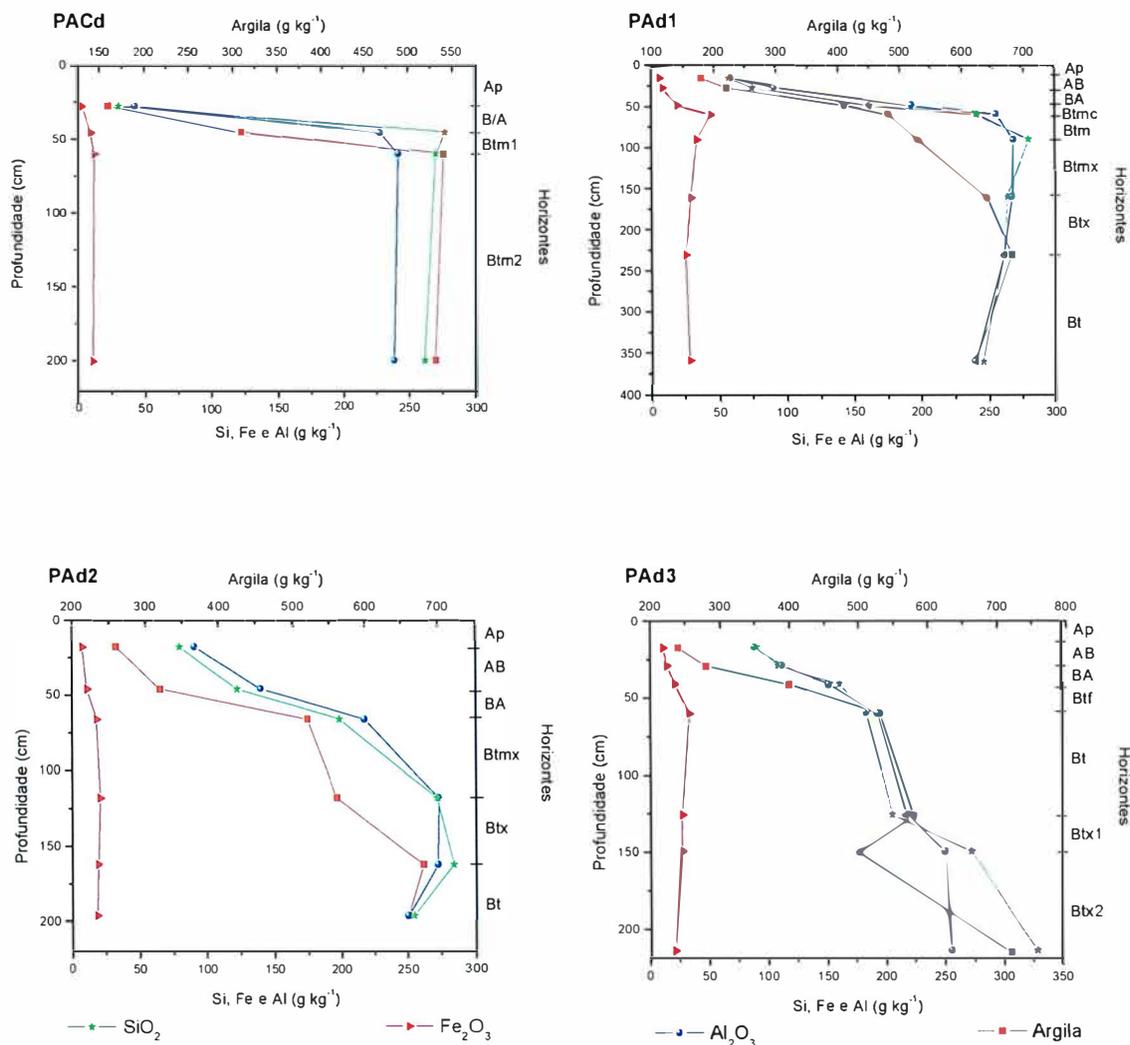


Figura 10 – Curvas com os teores de SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> extraídos por ataque sulfúrico e argila em função da profundidade, nos solos PACd – Argissolo Acinzentado Distrófico duripânico, PAd1 - Argissolo Amarelo Distrófico duripânico, PAd2 - Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico, PAd3 - Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico plíntico.

Si e Al não acompanham o comportamento da distribuição de argila no perfil (Figura 10).

Analisando as Tabelas 3 e 6, pode-se constatar que, nos três perfis finais da seqüência (PAd4, PAd5 e FFcd), os teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  vão sendo incrementados com a profundidade e, após atingirem os valores máximos sofrem redução. As maiores concentrações de silício e alumínio nos solos PAd4 e FFcd coincidem com os horizontes mais argilosos destes perfis, que são respectivamente Bt1 e Btcf1. No caso do PAd5, silício e alumínio estão mais altos no Bt2, onde o teor de argila ( $740 \text{ g kg}^{-1}$ ) é ligeiramente inferior ao do horizonte Btf subjacente ( $780 \text{ g kg}^{-1}$ ). Com essa caracterização, pode-se observar que as curvas com os teores de Si, Al e argila têm comportamento bastante semelhante nos Argissolos Amarelos Distróficos plínticos (PAd4 e PAd5) e no Plintossolo - FFcd (Figura 11).

Com relação aos demais constituintes que estão na Tabela 6 e determinados após o ataque sulfúrico, observa-se que os valores de manganês são extremamente baixos nos diversos horizontes dos solos analisados. Os horizontes subsuperficiais apresentam teores de titânio semelhantes, que não são elevados, porém ainda são superiores aos encontrados no topo dos perfis, exceto no caso do Plintossolo (FFcd).

O ferro apresenta comportamento semelhante ao do titânio, entretanto, pode-se ver pela Tabela 6 que há horizontes de alguns perfis que se destacam como zonas de acumulação. As maiores concentrações de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dentro do perfil, como nos horizontes Btmc do PAd1, Btf2 do PAd4, Btc do PAd5 e Apc do FFcd, podem ser bem visualizada nas Figuras 10 e 11.

Analisando-se todos os solos, observa-se que as menores concentrações de ferro são encontradas nos horizontes superficiais dos primeiros perfis da toposseqüência (Tabela 6), os quais apresentam relevo local mais plano e horizontes cimentados que dificultam a drenagem, com isso, na estação chuvosa essas camadas ficam mais facilmente encharcadas e, devido ao ambiente redutor, deixam o ferro no estado mais móvel ( $\text{Fe}^{2+}$ ) que é mais facilmente removido do meio pelo fluxo da água. Por outro lado, os horizontes mais ricos em ferro são aqueles que estão nos níveis inferiores da

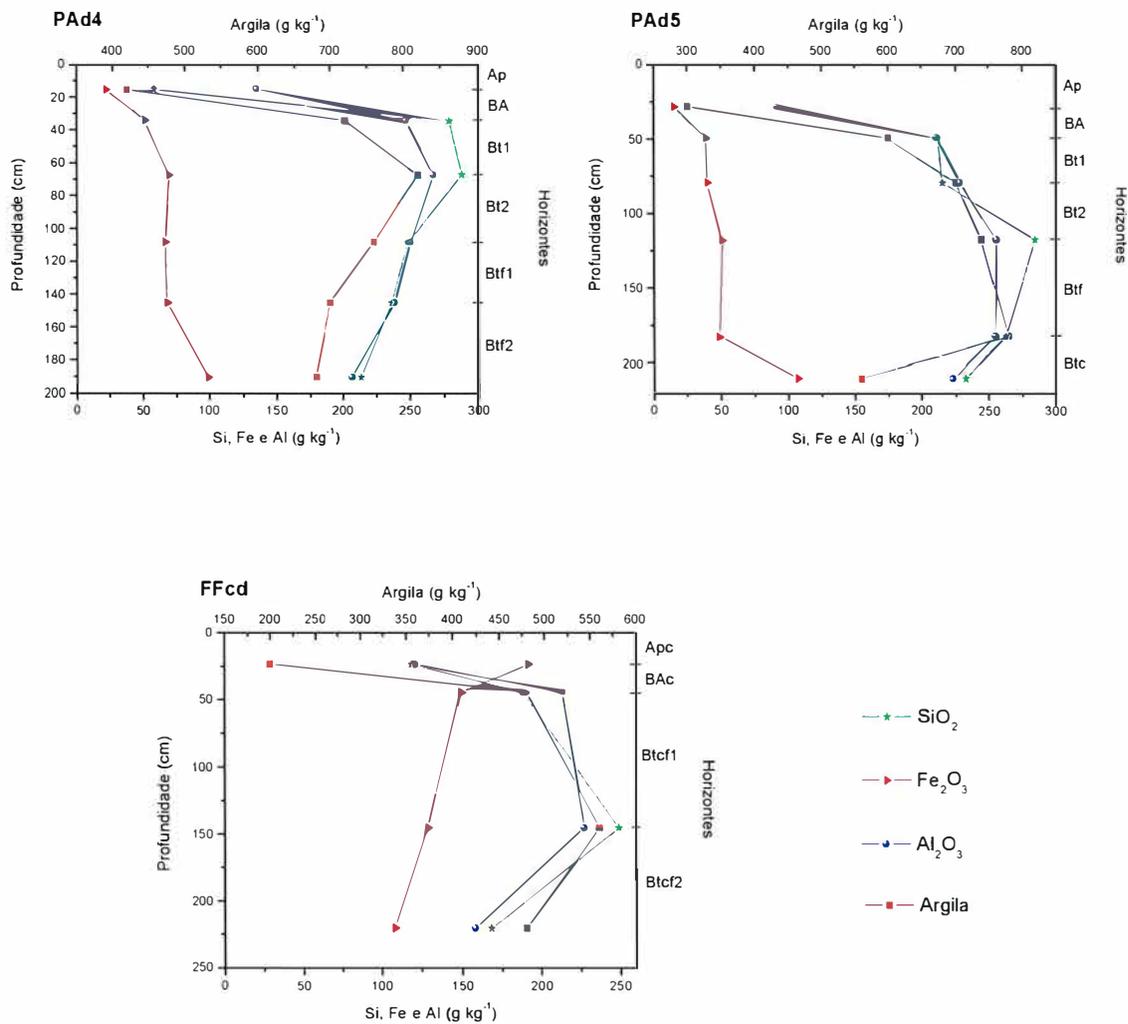


Figura 11 – Curvas com os teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  extraídos por ataque sulfúrico e argila em função da profundidade, nos solos PAd4 - Argissolo Amarelo Distrófico plintico, PAd5 - Argissolo Amarelo Distrófico plintico, FFcd – Plintossolo Pétrico Concrecionário Distrófico típico.

vertente (FFcd e últimos horizontes do PAd5 e PAd4), que atuam como área de acumulação do ferro transportado pelo fluxo de água lateral.

Os baixos teores de óxidos de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) determinados pelo ataque sulfúrico mostram a predominância do caráter hipoférrico nestes solos, pois as concentrações são inferiores a  $80 \text{ g kg}^{-1}$ . No caso do Plintossolo (FFcd) e dos últimos horizontes dos Argissolos Amarelos Distróficos plínticos, o caráter é considerado mesoférrico, pois neste caso os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  podem oscilar entre 80 e menos de  $180 \text{ g kg}^{-1}$  (Embrapa, 1999).

Os óxidos de ferro têm capacidade de realizar adsorção de fosfatos, portanto, mesmo os resultados das análises por fluorescência de raios-x (Tabela 5) indicando maiores teores de  $\text{P}_2\text{O}_5$  no perfil FFcd e na última camada do PAd5, observa-se que P disponível (Tabela 4) apresenta comportamento semelhante ao dos outros perfis.

Na Tabela 6 ainda são encontrados os índices Ki e Kr. Embora haja resultados que indiquem que o uso do índice Ki não seja adequado, esses problemas estão relacionados com solos contendo pouca argila (Oliveira, 2001), o que não é o caso dos Argissolos e Plintossolo desta topossequência.

Os baixos valores de Ki (Tabela 6) indicam que estes solos apresentam um elevado grau de intemperismo, corroborando a idéia da intensa lixiviação que esse material deve ter passado (*seção 4.3*). No entanto, estes solos não apresentam  $\Delta\text{pH}$  (diferença entre pH em KCl e pH em água) positivo ou nulo, comum em solos oxídicos bastante intemperizados com presença de carga líquida positiva nos colóides do solo.

Os valores de Kr, superiores a 0,75 (Tabela 6), indicam que a mineralogia da fração argila é predominantemente caulínica (Embrapa, 1999). Com exceção dos horizontes B/A do PACd e Btx2 do PAd3, os valores de Ki oscilaram entre 1,20 e 1,99, também sugerindo uma mineralogia caulínica para estes solos, pois, segundo Oliveira (2001), o índice Ki da caulinita é de 2,0.

#### 4.6 Extração de amorfos por oxalato de amônio

As médias dos teores de silício, alumínio e ferro extraídos pelo oxalato ácido de amônio, que foram expressos na forma de óxidos, estão relacionados na Tabela 7. Este método é utilizado para solubilizar o material amorfo ou de baixa cristalinidade e, de uma forma geral, pode-se observar que os teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  são os mais elevados, enquanto os de  $\text{SiO}_2$  não se encontram altos, o que também acontece com o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , com exceção para alguns horizontes, como será discutido em seguida.

Analisando-se a Tabela 7, verifica-se que o silício e o ferro extraídos pelo oxalato apresentam comportamento bem semelhante no Argissolo Acinzentado Distrófico duripânico (PACd). Os teores aumentam bruscamente do Ap para o B/A, porém,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  atingem o máximo do Btm1, onde apresentam respectivamente os valores de 2,34 e 1,76  $\text{g kg}^{-1}$  e, em seguida, sofrem uma grande redução no Btm2. O comportamento do alumínio é um pouco diferente porque o teor mais alto (18,57  $\text{g kg}^{-1}$ ) está no horizonte intermediário B/A.

No material que preenche a “língua” do Argissolo Acinzentado (PACd), os teores de todos os elementos são superiores aos do Btm2 (Tabela 7). Este fato deve ser justificado porque a drenagem interna deste perfil é feita predominantemente pelas rachaduras e, assim, os constituintes que vão sendo solubilizados nas camadas cimentadas podem apresentar uma concentração nesta área. O teor de matéria orgânica mais elevado do que no Btm2 também pode influenciar a presença de maiores teores de material amorfo, como já descrito nas fendas encontradas por Demattê et al. (1996) em área dos Tabuleiros Costeiros.

Na Figura 12 observa-se que o teor de argila aumenta a partir da superfície e se mantém elevado nos horizontes Btm1 e Btm2 do PACd, no entanto, os elementos extraídos pelo oxalato (Si, Al e Fe) sofrem incrementos embora apresentem teores menores no Btm2.

No perfil do Argissolo Amarelo Distrófico duripânico (PAD1), o horizonte mais fortemente cimentado e que está associado a uma concentração de ferro na forma bandada e litificada (Btmc), apresenta os mais elevados teores de silício (1,27  $\text{g kg}^{-1}$ ),

Tabela 7. Teores de Si, Al e Fe amorfos (expressos na forma de óxidos) extraídos por oxalato de amônio.

Hor	Prof	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	cm	----- g kg <sup>-1</sup> -----		
<b>P0: Argissolo Acinzentado Distrófico duripânico – PACd</b>				
Ap	0-27	0,14	1,70	0,25
B/A	27-45	1,60	18,57	0,90
Btm1	45-60	2,34	15,98	1,76
Btm2	60-200+	0,41	6,55	0,44
Ling	90-130	0,62	13,01	0,67
<b>P1: Argissolo Amarelo Distrófico duripânico – PAd1</b>				
Ap	0-15	0,56	3,03	1,00
AB	15-27	0,20	2,92	0,56
BA	27-48	0,84	11,67	1,13
Btmc	48-59	1,27	22,96	33,16
Btm	59-90	1,16	14,87	8,99
Btmx	90-160	0,33	5,02	1,52
Btx	160-230	0,28	3,84	1,00
Bt	230-360+	0,18	2,29	0,25
<b>P2: Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico – PAd2</b>				
Ap	0-18	0,13	2,58	0,52
AB	18-46	0,21	4,43	0,76
BA	46-66	0,27	6,66	2,31
Btmx	66-118	0,34	7,62	3,19
Btx	118-162	0,27	4,05	1,07
Bt	162-196+	0,23	3,29	0,54
<b>P3: Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico plíntico – PAd3</b>				
Ap	0-17	0,24	2,17	1,22
AB	17-29	0,15	2,04	1,56
BA	29-41	0,26	2,77	1,78
Btf	41-60	0,26	3,96	3,79
Bt	60-126	0,27	3,79	0,87
Btx1	126-150	0,30	3,51	1,09
Btx2	150-215+	0,27	3,01	0,58
<b>P4: Argissolo Amarelo Distrófico plíntico – PAd4</b>				
Ap	0-15	0,33	3,18	1,14
BA	15-34	0,38	4,32	1,69
Bt1	34-67	0,36	3,63	0,95
Bt2	67-108	0,35	3,20	1,12
Btf1	108-145	0,28	2,44	0,64
Btf2	145-190+	0,26	2,19	0,79
<b>P5: Argissolo Amarelo Distrófico plíntico – PAd5</b>				
Ap	0-28	0,43	2,81	1,09
BA	28-49	0,38	4,18	2,97
Bt1	49-79	0,38	4,22	1,69
Bt2	79-117	0,40	3,93	1,13
Btf	117-182	0,36	3,53	0,88
Btc	182-210+	0,30	3,00	0,78
<b>P6: Plintossolo Pétrico Concrecionário Distrófico típico – FFed</b>				
Apc	0-23	0,60	3,86	1,33
BAc	23-44	0,42	4,36	1,90
Btcf1	44-145	0,30	2,76	0,91
Btcf2	145-220+	0,18	1,51	0,32

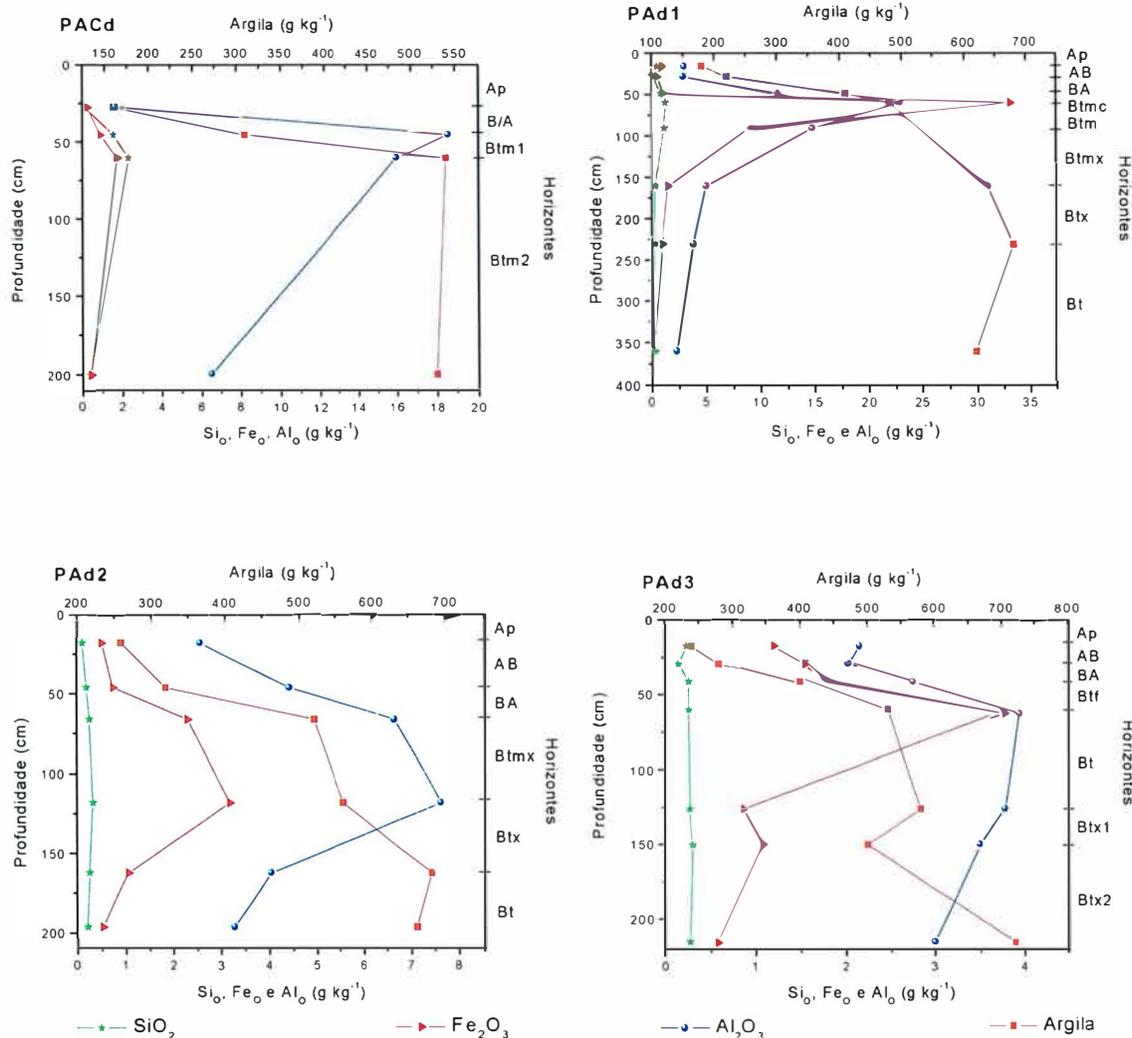


Figura 12 – Curvas com os teores de SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> extraídos por oxalato de amônio e argila em função da profundidade, nos solos PACd – Argissolo Acinzentado Distrófico duripânico, PAd1 - Argissolo Amarelo Distrófico duripânico, PAd2 - Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico, PAd3 - Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico plíntico.

alumínio ( $22,96 \text{ g kg}^{-1}$ ) e ferro ( $33,16 \text{ g kg}^{-1}$ ) amorfos, como pode ser visto na Tabela 7. Esses valores vão diminuindo até atingirem os menores teores na camada mais profunda (Bt), que não apresenta cimentação.

Comparando-se os teores extraídos pelo oxalato com o da argila do perfil PAd1, pode-se observar (Figura 12) que, nos horizontes imediatamente subjacentes ao Btmc, a argila continua aumentando enquanto os demais constituintes diminuem, inclusive de forma acentuada.

Os elementos solubilizados pelo oxalato apresentam diferenças entre os horizontes do Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico (PAd2), contudo as variações não são tão contrastantes como dos perfis anteriores. O horizonte que possui fragipãs e duripãs, identificado por Btmx, corresponde à camada onde estão os maiores teores de  $\text{SiO}_2$  ( $0,34 \text{ g kg}^{-1}$ ),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $7,62 \text{ g kg}^{-1}$ ) e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $3,19 \text{ g kg}^{-1}$ ), no entanto, estes valores são bastante inferiores aos máximos encontrados no PAd1 (Tabela 7). Nos horizontes abaixo do Btmx estes teores decrescem, enquanto que os de argila estão mais elevados (Figura 12).

No perfil do Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico plíntico (PAd3), o maior teor de  $\text{SiO}_2$  amorfa ( $0,30 \text{ g kg}^{-1}$ ) é encontrado no Btx1 (Tabela 7), que é a camada superior da zona de fragipãs (Btx1 + Btx2). Este teor de sílica não varia muito entre os horizontes que estão imediatamente sobrejacentes e no subjacente, porém, chega a ser o dobro daquele encontrado na transição AB. Proporcionalmente os teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  não sofrem grandes variações, como as observadas no início da topossequência. Contudo, o maior teor de alumínio ( $3,96 \text{ g kg}^{-1}$ ) se apresenta no Btf, onde o ferro ( $3,79 \text{ g kg}^{-1}$ ) também está mais concentrado e são encontrados fragmentos de uma banda ferruginosa (Apêndice 1).

Os horizontes do perfil PAd4 (Argissolo Amarelo Distrófico plíntico - PAd4) apresentam pequenas diferenças nos teores de silício (Tabela 7), sendo o maior valor ( $0,38 \text{ g kg}^{-1}$ ) encontrado no horizonte BA. É também neste horizonte que estão os maiores teores de alumínio e ferro amorfos, no entanto, a maior concentração de argila está na camada subjacente (Figura 13).

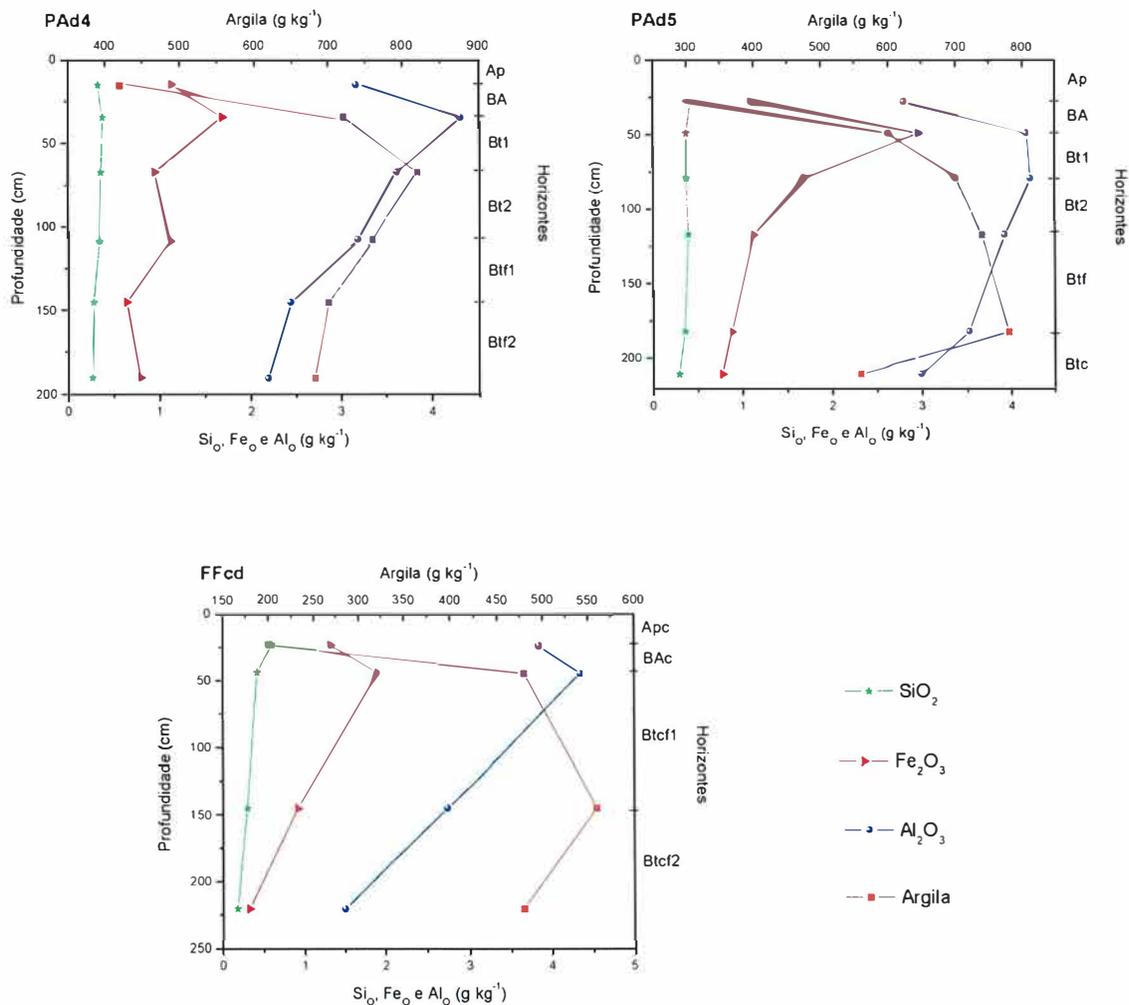


Figura 13 – Curvas com os teores de SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> extraídos por oxalato de amônio e argila em função da profundidade, nos solos PAd4 - Argissolo Amarelo Distrófico plíntico, PAd5 - Argissolo Amarelo Distrófico plíntico, FFcd – Plintossolo Pétrico Concrecionário Distrófico típico.

Pode-se observar na Tabela 7 que os teores mais elevados de  $\text{SiO}_2$  ( $0,43 \text{ g kg}^{-1}$ ),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $4,22 \text{ g kg}^{-1}$ ) e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $1,69 \text{ g kg}^{-1}$ ) estão em diferentes horizontes do Argissolo Amarelo Distrófico plíntico - PAd5 (PAd5), respectivamente no Ap, Btl e BA. Porém, estes horizontes estão no topo ou numa posição intermediária do perfil, enquanto os maiores teores de argila estão nas camadas mais profundas (Figura 13). Conforme já discutido na *seção 4.2*, a determinação da análise granulométrica do Btc foi prejudicada pela grande quantidade de petroplintitas na fração TFSA.

A variação nos teores de silício (Tabela 7) dentro do Plintossolo Pétrico Concrecionário Distrófico típico (FFcd) é maior do que a encontrada nos outros solos sem duripãs (PAd2 a PAd5), mas também pode-se observar que a concentração deste elemento é mais elevada ( $0,60 \text{ g kg}^{-1}$ ) no topo do perfil e diminui com a profundidade. Embora os teores de alumínio e ferro sejam mais altos próximos à superfície (Apc e BAc), os valores mais elevados ocorrem na transição BAc, respectivamente com  $4,36 \text{ g kg}^{-1}$  e  $1,90 \text{ g kg}^{-1}$ . O comportamento destes elementos e da argila dentro do perfil podem ser observados na Figura 13.

Fazendo uma análise conjunta envolvendo os diferentes solos da topossequência, pode-se observar na Tabela 7 que a sílica amorfa apresenta maiores teores em horizontes de ocorrência de duripãs. O valor encontrado no horizonte Btml do Argissolo Acinzentado – PACd - ( $2,34 \text{ g kg}^{-1}$ ) chega a ser mais de 15 vezes superior ao Ap do próprio PACd e do PAd2.

Os teores mais elevados de alumínio extraído pelo oxalato também são encontrados em camadas com duripãs (Tabela 7). A maior concentração deste alumínio amorfo ocorre no Btmc do PAdl ( $22,96 \text{ g kg}^{-1}$ ), que corresponde aproximadamente a 15 vezes o menor valor ( $1,51 \text{ g kg}^{-1}$ ) encontrado nestes solos e 10 vezes o teor mais baixo do perfil PAdl.

A diferença entre as concentrações de ferro amorfo é bastante exagerada, o maior teor ( $33,13 \text{ g kg}^{-1}$ ) supera em mais de 130 vezes o menor valor ( $0,25 \text{ g kg}^{-1}$ ), que são encontrados respectivamente nos horizontes Btmc e Bt dentro do Argissolo Amarelo Distrófico duripânico (PAdl).

Os teores de ferro determinados pela fluorescência de raios-x (Tabela 5) e por ataque sulfúrico (Tabela 6) não apresentam esta acentuada diferença entre os horizontes do PAd1. Teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  semelhantes e superiores, principalmente no ataque sulfúrico, são encontrados nas camadas dos solos com caráter plíntico (PAd4, PAd5 e FFcd). Entretanto, os teores de ferro amorfos nestes horizontes (Tabela 7) são muito inferiores ao do Btmc (PAd1), sugerindo que os processos envolvidos na concentração do Fe não foram semelhantes. Nesta diferenciação, as condições atuantes no ambiente de formação do Btmc são as que originam os duripãs, como as descritas por Boulet et al. (1998), Filizola et al. (2001), Moreau (2001) e Ucha et al. (2002), onde a drenagem é impedida e favorece o aparecimento de óxidos de ferro de pior cristalinidade (Schwertmann, 1985).

Estas condições que originaram o Btmc também podem ter ligação com o maior teor de alumínio amorfo determinado neste horizonte, pois os compostos de ferro podem ter passado por uma elevada proporção de substituição isomórfica do Fe pelo Al. No ambiente pedogenético, substituições nos óxidos de ferro por alumínio já foram relatadas há bastante tempo em goethitas (Norrish & Taylor, 1961) e em hematitas (Schwertmann et al., 1977). A concentração de íons diferentes do  $\text{Fe}^{3+}$  na solução do solo tem importante influência na intensidade de substituição isomórfica que ocorre nos óxidos de ferro (Schwertmann et al., 1979).

Em fragipãs que ficam temporariamente saturados por água, mas no verão e outono estão sob condições de oxidação, Duncan & Franzmeier (1999) constataram que os óxidos de ferro dissolvidos sofrem reprecipitação no outono, quando podem incorporar o alumínio livre e, então, propuseram que a maioria do Al desses fragipãs está nas estruturas dos óxidos de Fe.

Nos solos dos Tabuleiros Costeiros estudados por Duarte et al. (2000), a goethita dos mosqueados e nódulos apresentou um grau de substituição isomórfica (por Al) que variou de 17 a 25%. Embora tenha sido determinada uma baixa presença de gibbsita, o trabalho de Schwertmann & Kämpf (1985) indica que goethita, com esta intensidade de substituição, deve ocorrer associada com gibbsita.

Maiores concentrações de Si e Al amorfos também ocorrem nos horizontes cimentados de outros solos dos Tabuleiros (Boulet et al., 1998; Moreau, 2001 e Ucha,

2000). Porém, comparativamente, teores de Al e Si amorfos superiores aos deste estudo são encontrados no duripã estudado por Moreau (2001), o qual não está em ambiente de desestabilização, enquanto nos duripãs analisados por Boulet et al. (1998) e Ucha (2000), os teores de alumínio são inferiores aos encontrados nos duripãs desta topossequência.

Embora o alumínio e o ferro extraídos pelo oxalato apresentem valores superiores aos de silício, este constituinte pode ter uma grande atuação na cimentação, pois os teores nos duripãs são bem mais elevados do que os encontrados nos outros horizontes e, segundo Drees et al. (1989), pequena quantidade deste agente cimentante já é suficiente para profundos efeitos nas propriedades físicas, deixando o material duro a extremamente duro quando seco. Além do mais, Uehara & Jones (1972) citam que a sílica pode atuar na cimentação de material sem formar uma matriz contínua, como se pode observar nas pontes de sílica nos modelos de deposição de Chadwick et al. (1987) e Franzmeier et al. (1989).

## **4.7 Difratomia de raios-x**

### **4.7.1 Mineralogia da Amostra Total**

Na análise por difratometria de raios-x da amostra total (Figura 14), observa-se que os picos de maior intensidade do quartzo (0,334 e 0,426 nm) se destacam no Argissolo Acinzentado Distrófico duripânico (PACd). Os picos de 0,717 e 0,357 nm da caulinita aparecem nitidamente em todo o perfil. Índícios de gibbsita nos horizontes Ap e no material da “língua” (Ling) são marcados pelo pico de 0,485 nm. A identificação dos picos de 0,352 e 0,238 nm do anatásio pode não ficar bem clara devido à semelhança com os da caulinita e gibbsita, no entanto, o de 0,189 nm (B/A e Ling) indica a presença de anatásio.

Nos difratogramas da amostra total (Figura 14) do Argissolo Amarelo Distrófico duripânico (PAD1), observam-se grandes semelhanças com o PACd.

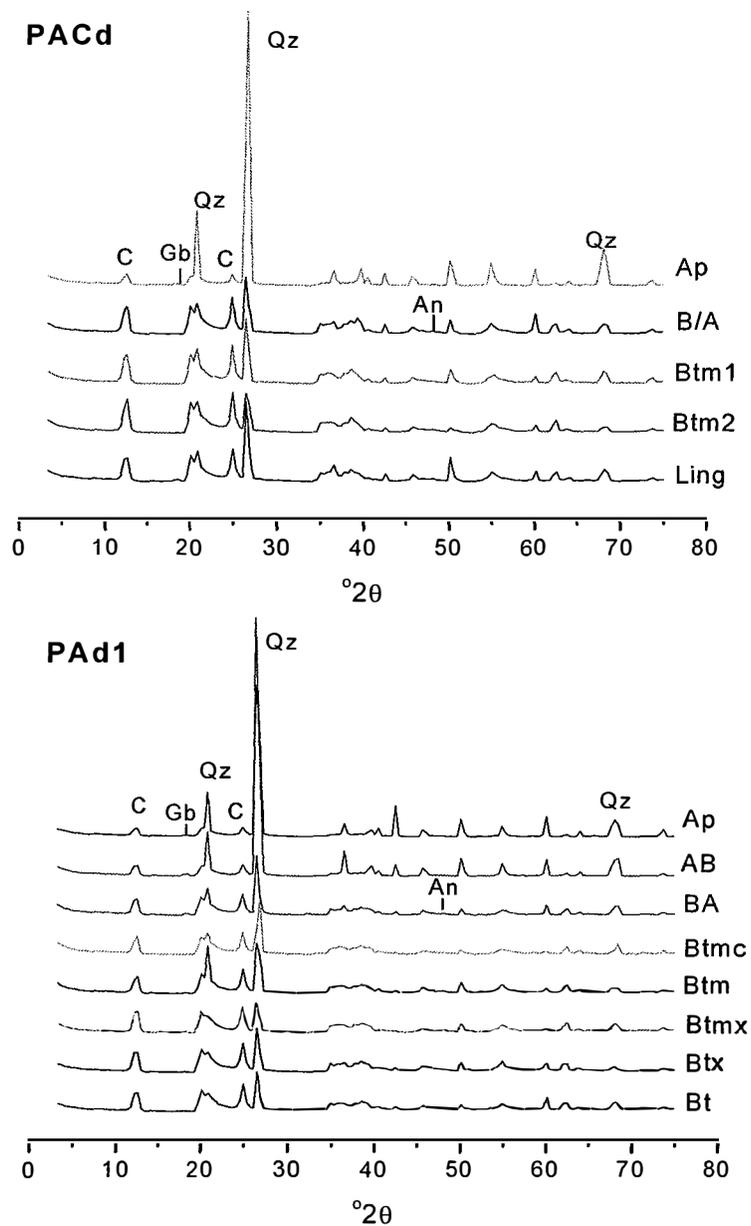


Figura 14 - Difratoqramas de raios-x da amostra total (macerada) dos horizontes do Argissolo Acinzentado Distrófico duripânico - PACd e do Argissolo Amarelo Distrófico duripânico - PAd1. Qz - quartzo, C - caulinita, Gb - gibbsita e An - anatásio.

Destacando-se os picos do quartzo e da caulinita, com indícios de ocorrência de gibbsita (exceto no Btmc e Bt) e anatásio (BA, Btm a Bt).

Os resultados da difratometria de raios-x permitem identificar que a mineralogia do Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico - PAd2 e do Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico plíntico - PAd3 (Figura 15) não difere dos dois perfis anteriores. Assim, são identificados quartzo e caulinita, sendo que picos da gibbsita podem ser encontrados nos diversos horizontes (exceto no Btx1 do PAd3) e não há indícios de anatásio na camada superficial e no Btx1.

Os difratogramas de raios-x (Figura 16) dos horizontes do Argissolo Amarelo Distrófico plíntico (PAd4) continuam caracterizando a ocorrência de quartzo e caulinita, além de indicar a presença de anatásio na subsuperfície. Entretanto, a composição mineralógica sofre alteração a partir desse perfil, pois os resultados não detectaram a gibbsita, além do mais, a partir do BA há indícios da ocorrência de hematita e goethita (picos de 0,269 e 0,418 nm ).

O aparecimento de óxidos de ferro, na mineralogia da amostra total, está bem relacionado com os teores de  $Fe_2O_3$  determinados pelo ataque sulfúrico (Tabela 6), pois, teores elevados de ferro estão distribuídos nos perfis PAd4, PAd5 e FFcd, os quais apresentam grande abundância de mosqueados avermelhados devido às concentrações localizadas de Fe (Figuras 6, 7 e 8).

Analisando os difratogramas de raios-x da Figura 16, observa-se que a distribuição dos minerais nos horizontes do Argissolo Amarelo Distrófico plíntico (PAd5) é semelhante a do PAd4. Quartzo e caulinita estão em todas as profundidades, enquanto que picos dos óxidos de ferro não são detectados na superfície e há indícios de anatásio em alguns horizontes (BA a Btf1).

No perfil do Plintossolo Pétrico Concrecionário Distrófico típico (FFcd), a análise por difratometria permitiu a identificação da presença de quartzo, caulinita e óxidos de ferro distribuídos em todo o perfil, assim como indícios de anatásio no BAc, como pode ser observado na Figura 17.

Sabe-se que a matéria orgânica causa desestabilização à hematita. No entanto, o teor de matéria orgânica no FFcd é mais elevado do que no PAd4 e PAd5 (Tabela 4),

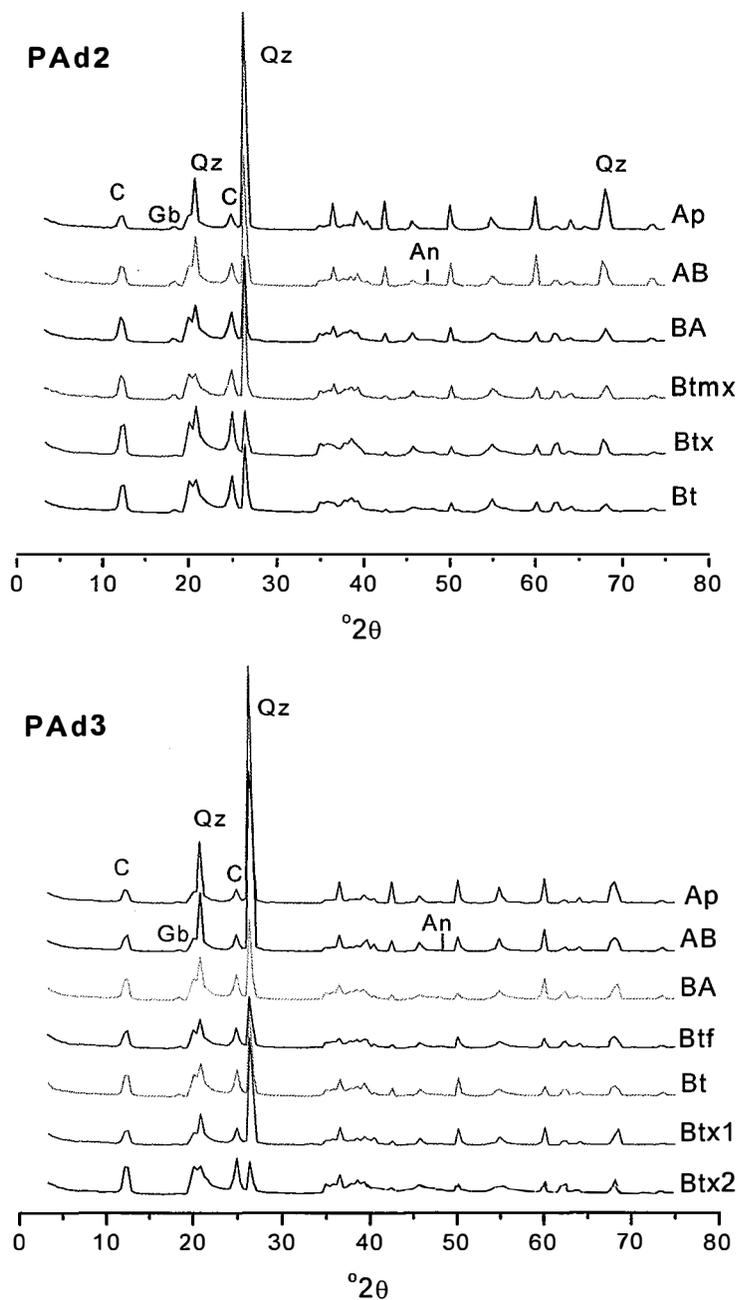


Figura 15 - Difratoigramas de raios-x da amostra total (macerada) dos horizontes do Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico – PAd2 e do Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico plúntico – PAd3. Qz - quartzo e C – caulinita, Gb – gibbsita e An – anatásio.

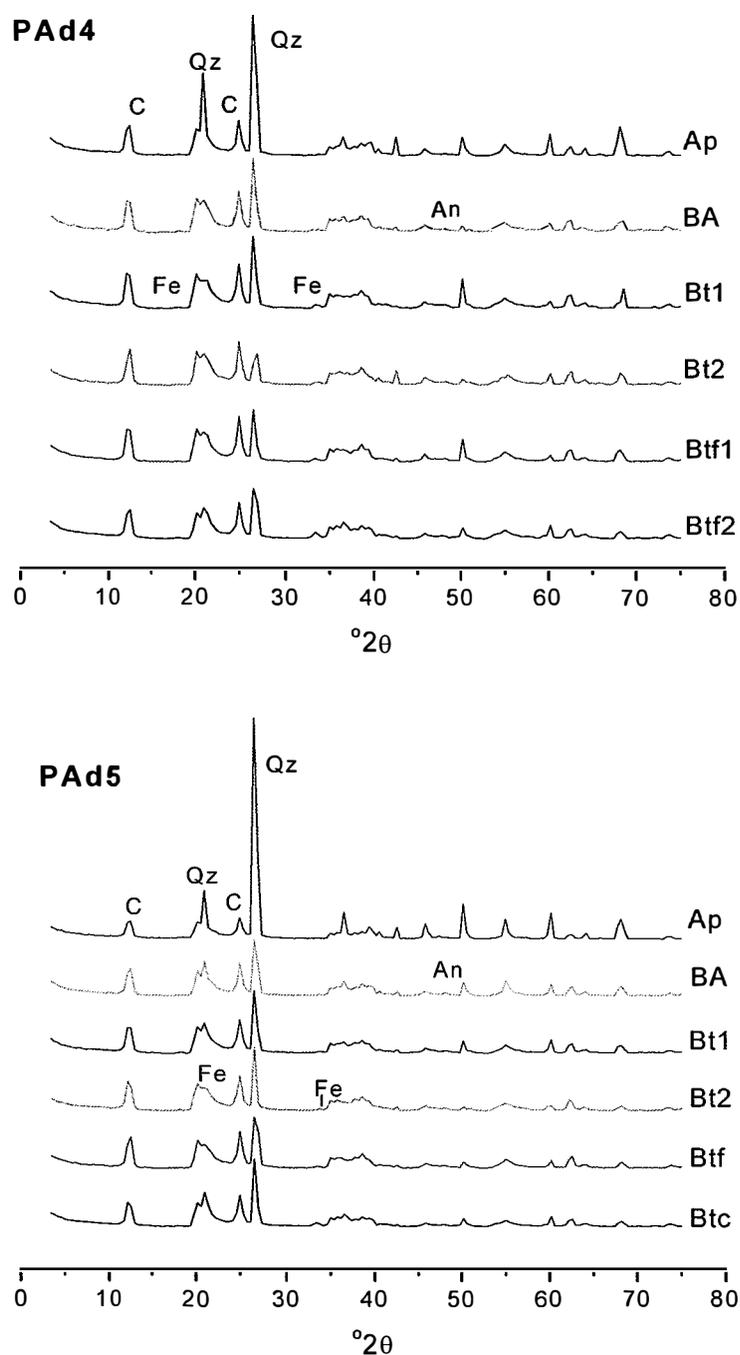


Figura 16 - Difrátogramas de raios - x da amostra total (macerada) dos horizontes do Argissolo Amarelo Distrófico plúntico - PAd4 e do Argissolo Amarelo Distrófico plúntico - PAd5. Qz - quartzo e C - caulinita, An - anatásio e Fe - óxidos de ferro.

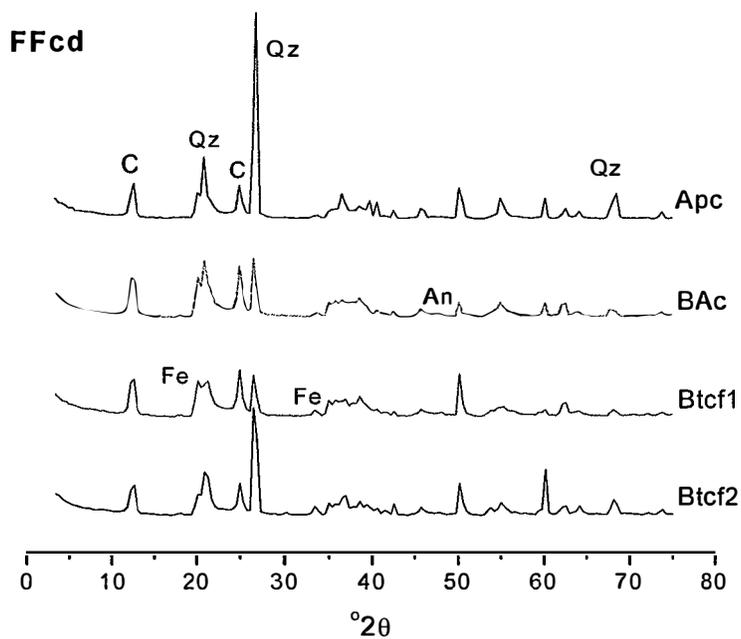


Figura 17 - Difractogramas de raios-x da amostra total (macerada) dos horizontes do Plintossolo Pétrico Concrecionário Distrófico típico – FFcd. Qz - quartzo e C – caulinite, An - anatásio e Fe – óxidos de ferro.

#### 4.7.2 Mineralogia da Fração Argila

Os resultados obtidos pela difratometria de raios-x da fração argila também mostram uma mineralogia pouco variável entre os perfis estudados. Nas figuras 18 e 19, que ilustram os resultados deste tópico, são apresentados os difratogramas da argila saturada com potássio a temperatura ambiente (22° C). Os difratogramas com os diversos tratamentos da argila podem ser encontrados no Apêndice 2.

Analisando os difratogramas de raios-x da fração argila do perfil PACd, observa-se em todos os horizontes a presença da caulinita (Figura 18), claramente identificada pelos picos mais intensos de 0,717 e 0,357 nm. A gibbsita é encontrada no horizonte superficial, na camada mais profunda de duripã (Btm2) e no material que preenche a rachadura (Ling). Diferentemente do que ocorre na amostra total, na fração argila o anatásio pode ser identificado em todas as amostras do perfil.

No perfil PAd1, os difratogramas (Figura 18) mostram a ocorrência de caulinita e anatásio nos diferentes horizontes, sejam eles cimentados ou não, no entanto, a gibbsita só não foi detectada no Bt.

Os constituintes mineralógicos dos perfis PAd2 e PAd3, identificados pelos difratogramas (Figura 18), são os mesmos encontrados nos solos anteriores, sendo que além da caulinita e do anatásio, a gibbsita também está presente em todos os horizontes destes dois perfis.

Nos difratogramas dos perfis PAd4, PAd5 e FFcd não foi detectado nenhum mineral diferente daqueles já existentes nos outros solos (Figura 19). A caulinita e o anatásio estão distribuídos nos diferentes horizontes, enquanto que, a gibbsita só não foi identificada nos Btx1 e Btx2 do PAd4, assim como no Ap, Btf e Btc do FFcd.

Portanto, pelos resultados da difratometria de raios-x, observa-se que a fração argila desta topossequência dos Tabuleiros Costeiros não apresenta mineralogia diversificada. Embora Melo & Santos (1996) tenham descrito solos que apresentassem somente caulinita, a presença de gibbsita, anatásio e outros minerais em solos e sedimentos da Fm. Barreiras já foi citada por diversos autores, dentre eles Demattê et al. (1996); Duarte et al. (2000); Jacomine (1974); Melo et al., (2002a) e Moreau, (2001).

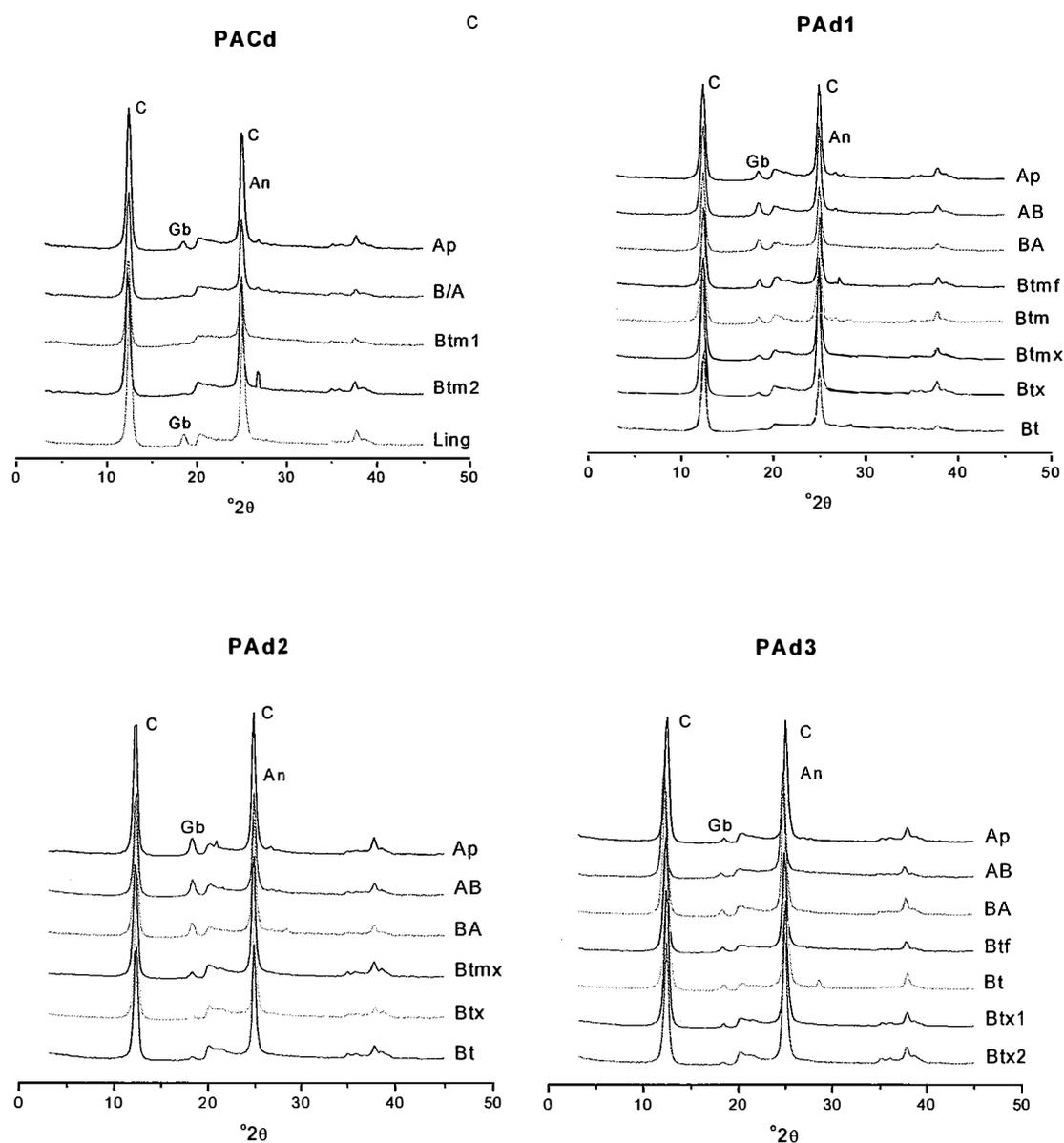


Figura 18 - Difractogramas de raios - x da fração argila saturada com potássio ( $22^{\circ}$  C) dos diferentes horizontes do Argissolo Acinzentado Distrófico duripânico – PACd, Argissolo Amarelo Distrófico duripânico – PAd1, Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico – PAd2 e do Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico plúntico – PAd3. C – caolinita, Gb – Gibbsita e An - anatásio.

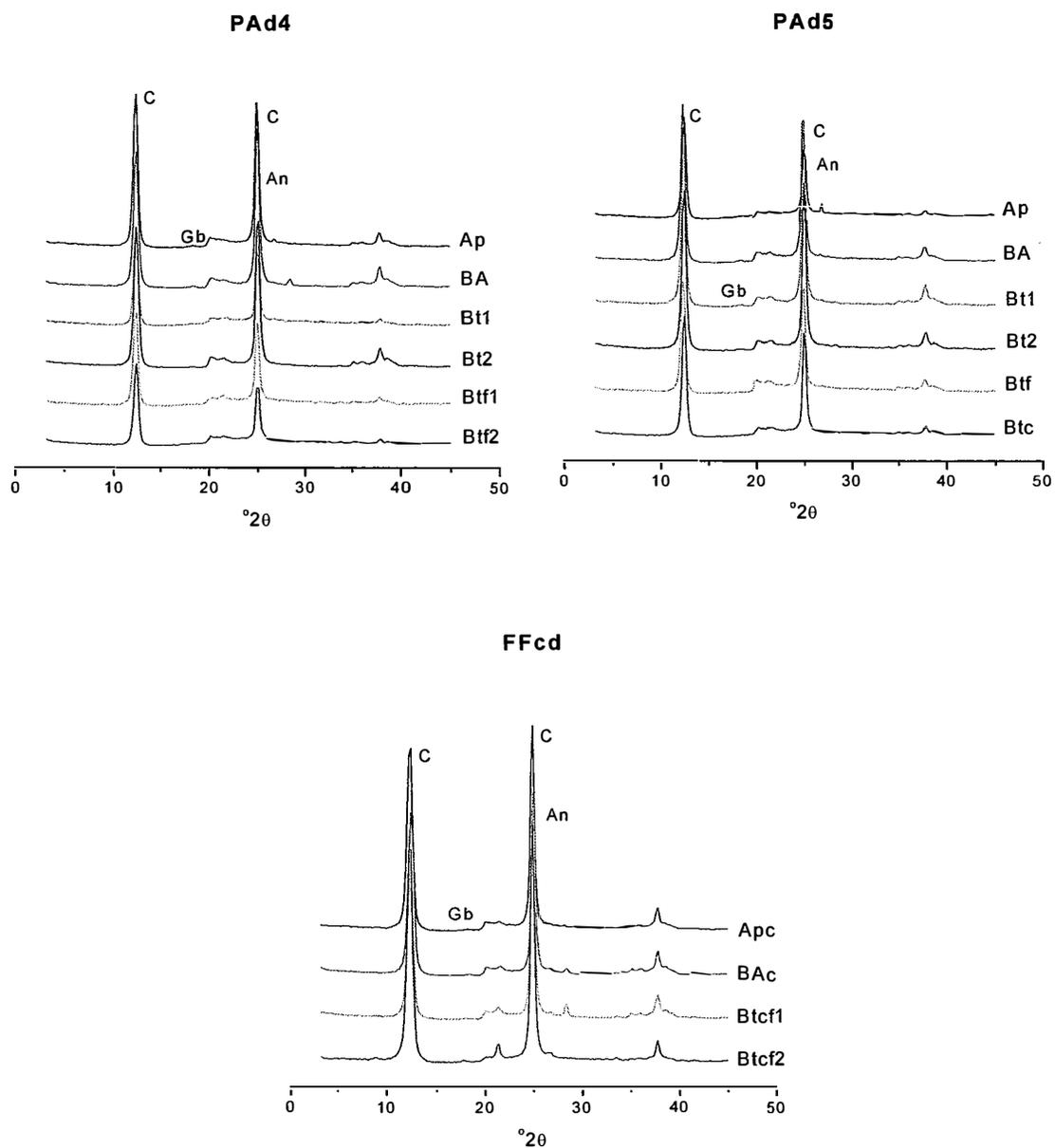


Figura 19 - Difratoqramas de raios - x da fração argila saturada com potássio ( $22^{\circ}$  C) dos diferentes horizontes do Argissolo Amarelo Distrófico plúntico – PAD4, Argissolo Amarelo Distrófico plúntico – PAD5 e Plintossolo Pétrico Concrecionário Distrófico típico – FFcd. C – caulinita e Gb – Gibbsita.

O pico mais intenso do anatásio (0,352 nm) pode ficar mascarado pelo de 0,357 da caulinita, que apresenta uma larga base nos difratômetros obtidos, no entanto, no tratamento com aquecimento a 550° C observa-se que o pico do anatásio permanece (Apêndice 2). Melo et al. (2002a), após tratamento químico para eliminação da caulinita, também detectaram anatásio na fração argila em camadas do solo e sedimentos da Fm. Barreiras.

As caulinitas podem apresentar o pico de primeira ordem com intensidade inferior ao pico de segunda ordem, como nas Figuras 18 e 19. Entretanto, este fato foi observado em todos os solos dos Tabuleiros Costeiros estudados por Moreau (2001), que procurou justificar pela possível associação da caulinita ao anatásio.

Na análise química da caulinita desse material dos Tabuleiros Costeiros, Melo et al. (2002c) encontraram titânio, o qual é relatado como um elemento que pode estar adsorvido à superfície da argila e, devido à substituição isomórfica, pode fazer parte da estrutura do mineral. Entretanto, os autores também citam que, no trabalho de Nagelshmidt et al., a presença de Ti em caulinita (padrão da Geórgia) também foi atribuída à associação com anatásio.

A mineralogia caulinitica e quartzosa, como já descrito, é comum nas áreas dos Tabuleiros Costeiros devido aos intensos processos que atuaram para que houvesse a sedimentação da Fm. Barreiras. Este material de elevada estabilidade, não se modificou substancialmente com os processos de pedogênese posteriores, porque as variações nas precipitações não são suficientes e, associado ao relevo tabular, as cotas são relativamente uniformes, não acarretando grandes alterações na temperatura do solo. Estas condições não favorecem a diferenciação entre os constituintes dos solos, que passam a ser determinadas pela granulometria e pela drenagem, principalmente (UFV, 1984).

Nos solos abundantes em caulinita e bastante intemperizados, como dos Tabuleiros Costeiros, Melo et al. (2002d) encontraram que esse argilomineral é responsável por mais de 50% do total de K e Mg, constituindo uma considerável reserva destes elementos. Isto é bastante importante porque as bases trocáveis normalmente são encontradas com baixos teores, tais como foram observadas neste trabalho (Tabela 4).

Melo et al. (2001) citam que os maiores teores de K e Mg estão nas menores partículas de caulinita, que apresentam menor grau de cristalinidade. Assim, nas camadas superficiais dos sedimentos da Formação Barreiras, Melo et al. (2002b) constataram que a caulinita teve uma grande contribuição nos elevados teores de K e Mg extraídos com NaOH. Porém, nas profundidades maiores, a contribuição da mica foi mais expressiva no teor de K total.

A difratometria não identificou ocorrência de mica nos solos estudados, porém, alguns autores (Demattê et al, 1996 e Ribeiro et al., 1995) mencionam a presença de mica que, às vezes, ocorre apenas como traços em solos desenvolvidos da Fm. Barreiras. Contudo, Melo et al. (2002d) concluíram que nos solos bem intemperizados, como os dos Tabuleiros, somente após a remoção dos óxidos de ferro e da caulinita é possível se detectar a mica por DRX.

Embora os solos dos Tabuleiros Costeiros sejam predominantemente cauliniticos, e os índices  $K_i$  e  $K_r$  (Tabela 6) destes solos também se relacionem com esta mineralogia, observa-se a presença da gibbsita que está bem caracterizada na análise realizada, pois, onde foi identificada, seu pico de alta intensidade (0,485 nm) pode ser visualizado nos difratogramas da argila em condições naturais (somente desferrificada) e saturada com K (22° C), mas observa-se seu desaparecimento com o aquecimento a 350° C (Apêndice 2).

Nos difratogramas de raios-x não foi detectado o pico de 0,435 nm da gibbsita, embora, além do mais intenso (0,485 nm), se encontre outro(s) de menor intensidade, como o de 0,238 nm, indicando que este mineral está pobremente cristalizada (Hsu, 1989).

O grau de cristalinidade da caulinita não foi avaliado neste estudo, contudo, sob clima tropical úmido é comum este mineral ter baixa cristalinidade (Hughes & Brown, 1979; Singh & Gilkes, 1992 e Melo et al., 2001). A cristalinidade da caulinita, como é citado por Melo et al. (2002c), pode ser influenciada pela presença de ferro na estrutura do mineral e pela existência de minerais (2:1) residuais no interior da estrutura da caulinita.

A caulinita de elevada cristalinidade, descrita por Dixon (1989), é encontrada como placas hexagonais, mas este mineral pode chegar a apresentar forma tubular, quando o grau de desordem estrutural é alto (Singh & Gilkes, 1992), já Melo et al. (2001) indicam que o elevado intemperismo pode causar a perda das faces euédricas da caulinita. Diversas feições da caulinita foram encontradas no material da Fm. Barreiras estudado por Melo et al. (2002c), no qual quase a metade das caulinitas apresentava formas alongada e circular, enquanto que menos de 7% apresentavam formas hexagonais.

Deve-se destacar que os horizontes com fragipãs e duripãs apresentam os picos gibbsita (Figura 18), exceto no B/A e Btm1 do Argissolos Acinzentado (P0), embora não se deva descartar a presença do mineral nesses horizontes, pois, segundo Jackson (1969), conteúdos de gibbsita iguais ou inferiores a  $50 \text{ g kg}^{-1}$  podem não ser detectados na difratometria de raios-x.

Material dos Tabuleiros Costeiros em que duripãs e fragipãs possuem gibbsita na composição mineralógica também foi descrito por Moreau (2001). Por outro lado, Demattê et al. (1996) e Jacomine (1974) não indicam a presença deste mineral nessas feições.

A drenagem deficiente em depressão fechada, que é comum nesses ambientes onde ocorrem os fragipãs e duripãs, associada à disponibilidade de sílica e aos baixos teores de Fe no material da Fm. Barreiras, são fatores descritos por Duarte et al. (2000) que contribuem para manter  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  em atividade na solução do solo. Nesta condição, há tendência de estabilização da caulinita e inibição para formação de gibbsita (Lindsay, 1979). Por isso, mesmo em solos dos tabuleiros que não apresentam fragipãs e duripãs, a gibbsita quando está presente ocorrem em pequena quantidade, como a descrita por Duarte et al. (2000).

Outros minerais que já foram identificados em alguns trabalhos não foram constatados nestes solos. A haloisita, por exemplo, foi determinada por Jacomine (1974) e, apesar de Moreau (2001) não tê-la detectada, a pesquisadora cita autores que relatam a presença deste componente, principalmente nos fragipãs e duripãs. No presente estudo, a

difratometria de raios-x não indicou a ocorrência deste mineral em nenhum dos horizontes.

## **4.8 Análises por microscopia**

### **4.8.1 Microscopia ótica**

A avaliação micromorfológica por microscopia ótica, usando-se lâminas de seção delgada, permitiu que fossem observadas várias características dos horizontes, dentre as quais serão descritas a seguir aquelas julgadas como principais para a diferenciação dos horizontes cimentados.

No Argissolo Acinzentado Distrófico duripânico (PACd), o teor de matéria orgânica mais elevado no horizonte Ap (Tabela 4) naturalmente ocasiona o desenvolvimento de um plasma mais escuro, com material pedal mais definido (Figura 20a). A fração grosseira é constituída quase exclusivamente de quartzos, pobremente selecionados, subarredondados, embora apareçam partículas arredondadas. Este material é revestido parcial ou integralmente pelo plasma, caracterizando a distribuição relativa tipo quitônica. Onde ocorre agregação com o desenvolvimento de blocos subangulares, observa-se uma massa plásmica envolvendo algumas partículas grosseiras, acarretando numa distribuição classificada de porfírica. A elevada porosidade é principalmente do tipo empacotamento simples, decorrente dos espaços existentes entre as frações grosseiras, no entanto, também são encontrados poros de empacotamento complexo e canais.

A fotomicrografia do horizonte Btm do PACd (Figura 20b) apresenta algumas características muito diferentes daquela no topo do perfil (Ap), contudo, a fração grosseira é semelhante. A distribuição relativa é tipicamente porfírica, na qual o plasma denso e contínuo está como o constituinte dominante da lâmina, mas possui material grosseiro inserido numa frequência comum. Destaca-se uma porosidade bastante reduzida, com poros praticamente não interconectados e constituídos por raras cavidades e canais associados a algumas fissuras. Feições pedológicas texturais, tais como cutãs,

também são observadas associadas a alguns desses poros, os quais podem apresentar preenchimento completo ou incompleto. Os cutãs constituídos por argilas iluviadas formam os argilãs (de ocorrência freqüente nos poros), enquanto a ocorrência de ferrãs (pouco) se deve à concentração de compostos de ferro.

No Argissolo Amarelo Distrófico duripânico (PAd1) procurou se fazer um maior número de análises, pois é o perfil de maior profundidade e onde pode ser encontrada uma maior variação de horizontes, pois, após a camada superficial há materiais extremamente cimentados (duripãs), em seguida ocorre menor cimentação (fragipãs) e, no final do perfil, o material é friável. Nos demais perfis houve maior preocupação com as camadas superiores dos horizontes iluviais e com cimentação mais intensa.

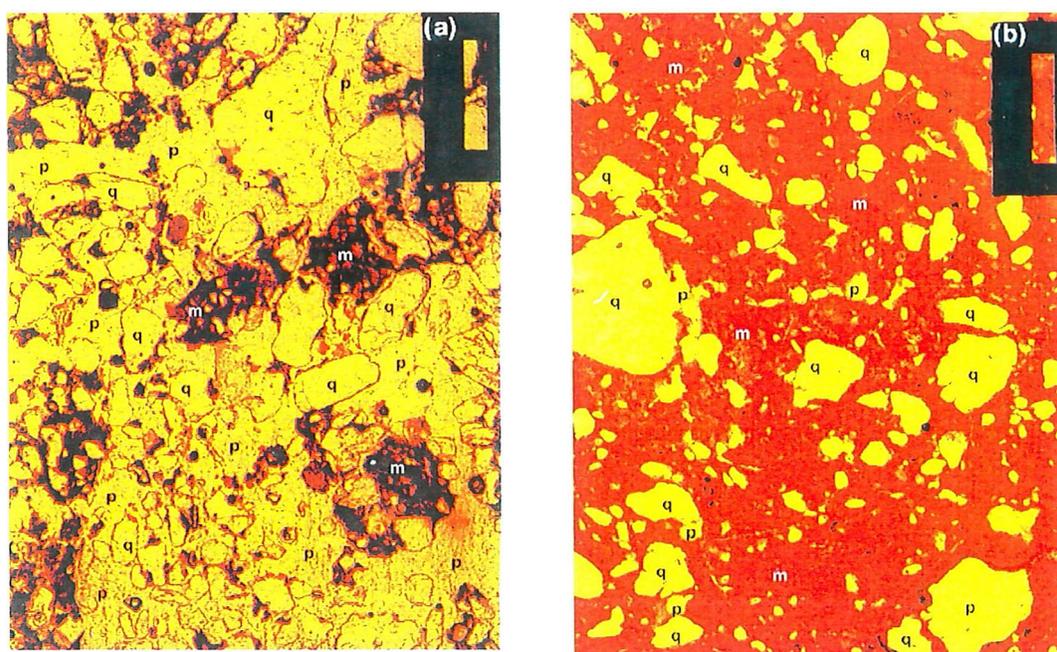


Figura 20 – Fotomicrografias do Argissolo Acinzentado Distrófico duripânico – PACd. Horizontes Ap (a) e Btm1 (b). Comprimento longitudinal interno da barra = 200  $\mu$ m. m-matriz plásmica, p-poro, q-quartzo.

O aspecto micromorfológico no horizonte Ap (Figura 21a) do Argissolo Amarelo Distrófico duripânico (PA1) é semelhante ao encontrado na camada superficial do PACd. A fração grosseira é dominada por quartzos pobremente selecionados, subarredondados e alguns arredondados. O plasma mais escuro, devido à matéria orgânica, também aparece com frequência na lâmina e a distribuição relativa dominante é quito-porfírica.

No horizonte Btmc do solo PA1, os quartzos da fração grosseira ocorrem numa frequência comum, apresentando grau de seleção e arredondamento semelhante aos demais horizontes. Nesta lâmina ocorrem duas zonas distintas, ambas com distribuição relativa porfírica. A zona predominante, com plasma denso e contínuo, é a de menor porosidade e que apresenta um vermelho mais intenso (Figura 21b), onde as raras cavidades, assim como os canais e fissuras normalmente estão preenchidos por argilãs (frequentes) e ferrãs (comuns) de forma densa e completa. A outra área possui uma maior porosidade que é mais interconectada (Figura 21c).

A caracterização da fração grosseira do horizonte Btm no PA1 (Figura 21d) é igual a da camada anterior (Btmc), assim como a distribuição relativa que é porfírica. Embora a porosidade ainda seja pequena, apresenta-se maior que a da zona mais densa do Btmc. Ferrãs e argilãs ocorrem de forma comum e constituem as feições pedológicas que preenchem de forma densa e incompleta as cavidades e alguns canais e fissuras, contudo, estes dois tipos de poros também sofrem preenchimento completo.

Na lâmina do horizonte Btmx (PA1) são encontradas duas zonas distintas, no entanto, em ambas a fração grosseira não difere do que foi observado nos demais horizontes e a distribuição relativa também é porfírica (Figura 22a, b). Pode-se verificar que a caracterização das zonas é semelhante a do Btmc, pois a área com menos poros (Figura 22a) tem coloração mais avermelhada do que onde há mais poros com interconexões (Figura 22b). Poucos cutãs do tipo argilãs e ferrãs são encontrados apresentando preenchimento denso e incompleto.

O horizonte Btx (PA1) apresenta zonas semelhantes àsquelas das camadas cimentadas (Figura 22c). No entanto, nas áreas dos grandes canais e câmaras, pode-se observar material pedal constituído por microagregados granulares e blocos

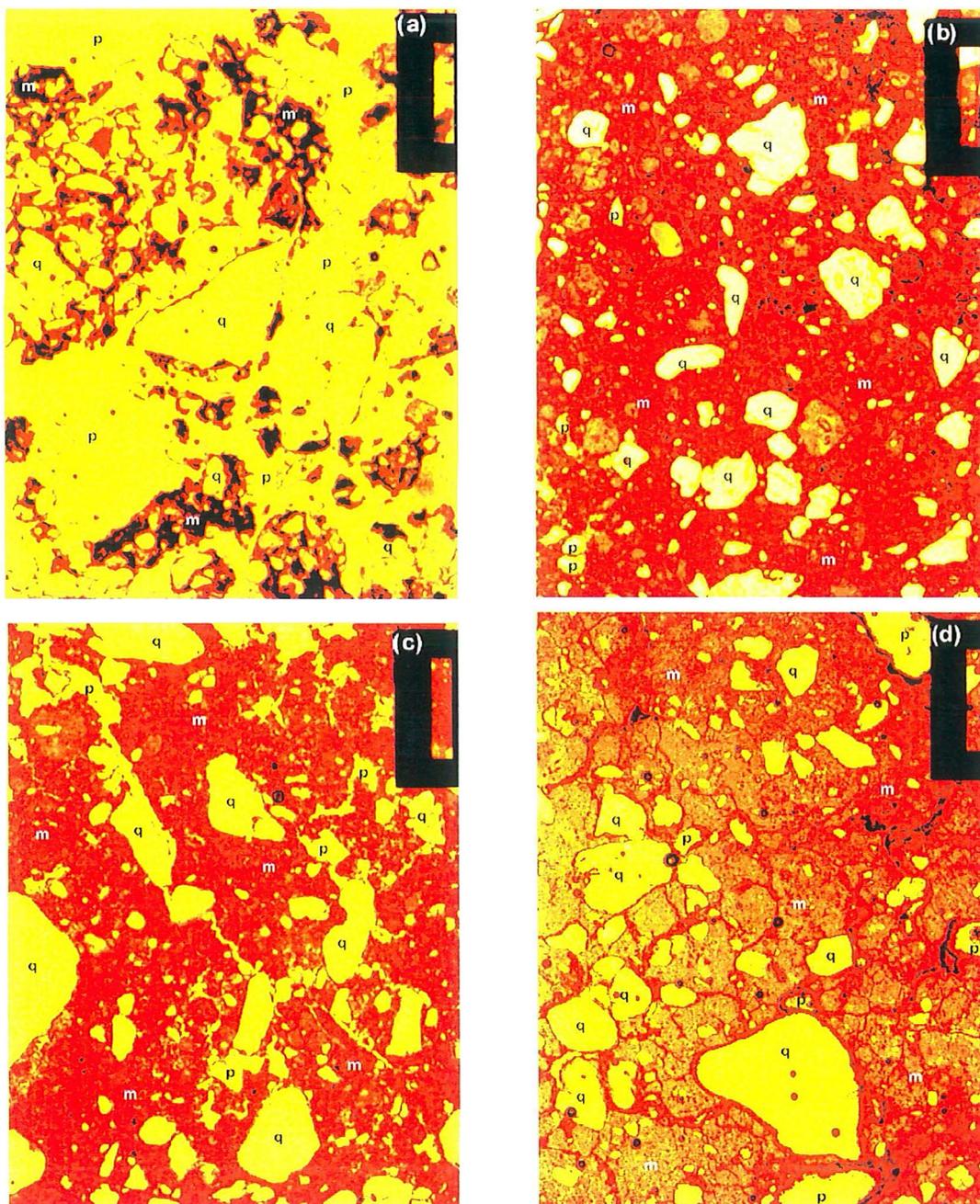


Figura 21 – Fotomicrografias do Argissolo Amarelo Distrófico duripânico - PADl. Horizontes Ap (a), Btmc com zona de plasma mais denso (b) e mais poroso (c), Btm (d). Comprimento longitudinal interno da barra = 200  $\mu\text{m}$ . m-matriz plásmica, p-poro, q-quartzo.

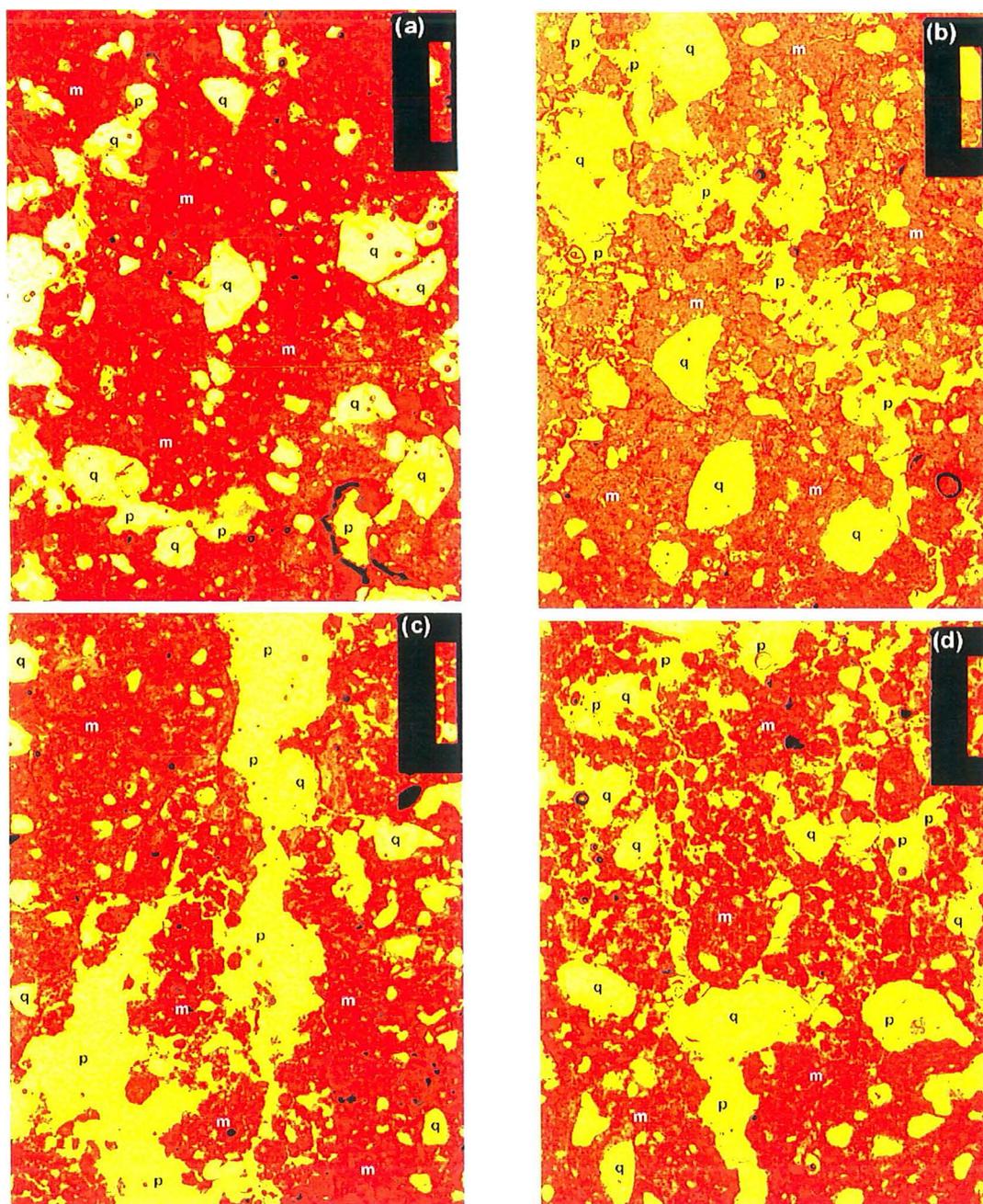


Figura 22 – Fotomicrografias do Argissolo Amarelo Distrófico duripânico - PAAd1. Horizontes Btmx com menos poros (a) e maior porosidade (b), Btx (c) e Bt(d) Comprimento longitudinal interno da barra = 200  $\mu\text{m}$ . m-matriz plásmica, p-poro, q-quartzo.

subangulares, com grau moderado a fortemente desenvolvido. Esta pedalidade se intensifica no horizonte Bt (PAd1), no qual estes agregados se encontram distribuídos com maior frequência no fundo matricial (Figura 22d). Nas lâminas destes dois horizontes as características do esqueleto não diferem daquelas encontradas nas demais camadas, assim como a distribuição relativa continua predominantemente do tipo porfírica. Poucos argilãs e ferrãs apresentando preenchimento denso e incompleto são observado no Btx, enquanto o horizonte Bt apresenta poucos ferrãs e muito pouco argilãs.

As fotomicrografias 23a e 23b são do horizonte Btmx do Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico (PAd2). Esta camada (Btmx), que apresenta materiais cimentados, possui um aspecto micromorfológico (Figura 23b) predominantemente semelhante ao da zona mais porosa do horizonte Btmx no PAd1 (Figura 22b). Contudo, nas áreas de menor porosidade (Figura 23a), as concentrações de ferrãs são mais intensas, apresentando uma frequência comum. Os argilãs estão frequentemente distribuídos por toda a lâmina.

No Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico plântico (PAd3), a lâmina do horizonte Bt apresenta duas zonas bem distintas, uma de menor porosidade (Figura 23c), onde a fração grosseira não difere do que foi observado nos demais horizontes e apresenta uma distribuição relativa identificada como porfírica. Na outra zona, com formação de microagregados e, assim, o grau de pedalidade mais desenvolvido (Figura 23d), pode-se observar inclusive distribuição enáulica. A ocorrência de argilãs é caracterizada como de frequência comum.

O horizonte textural (Bt1) do perfil PAd4 - Argissolo Amarelo Distrófico plântico - apresenta uma caracterização micromorfológica semelhante a que foi descrita no PAd3. Na lâmina pode-se observar uma zona com maior densidade de plasma e menor distribuição de poros (Figura 24a), contrastando com a zona mais porosa onde o material pedal é fortemente desenvolvido (Figura 24b).

No perfil PAd5, também classificado como Argissolo Amarelo Distrófico plântico, a lâmina do horizonte Bt1 apresenta maior proporção de plasma do que dos outros constituintes (Figura 24c), ocorrendo predominantemente uma distribuição relativa do

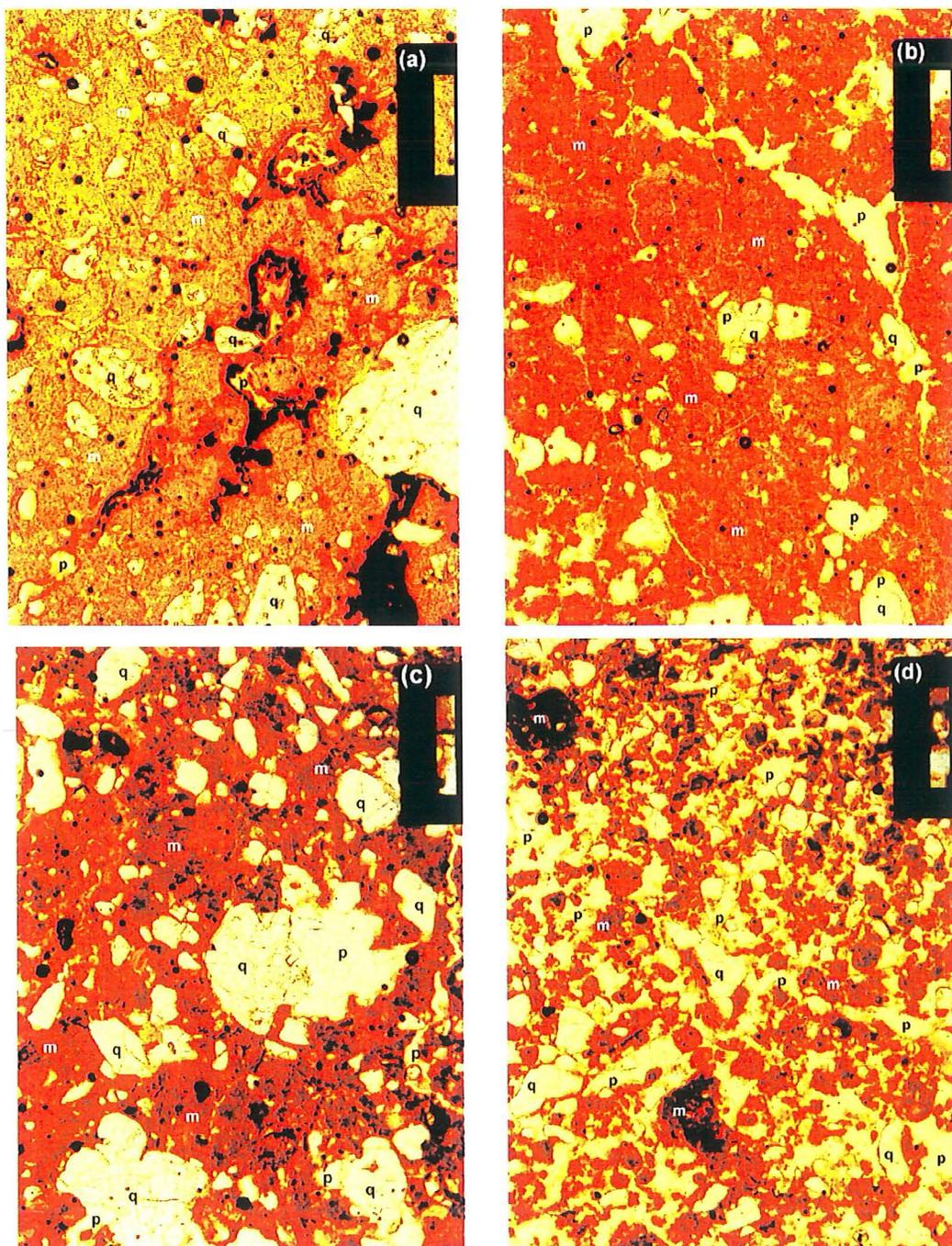


Figura 23 – Fotomicrografias : zona de acumulação de ferrãs - argilãs (a) e maior porosidade (b) no horizonte Btmx do PAD2. Zona de menor porosidade (c) e com microagregados (d) no horizonte Bt do PAD3. Comprimento longitudinal interno da barra = 200  $\mu\text{m}$ . m -matriz plásmica, p-poro, q-quartzo.

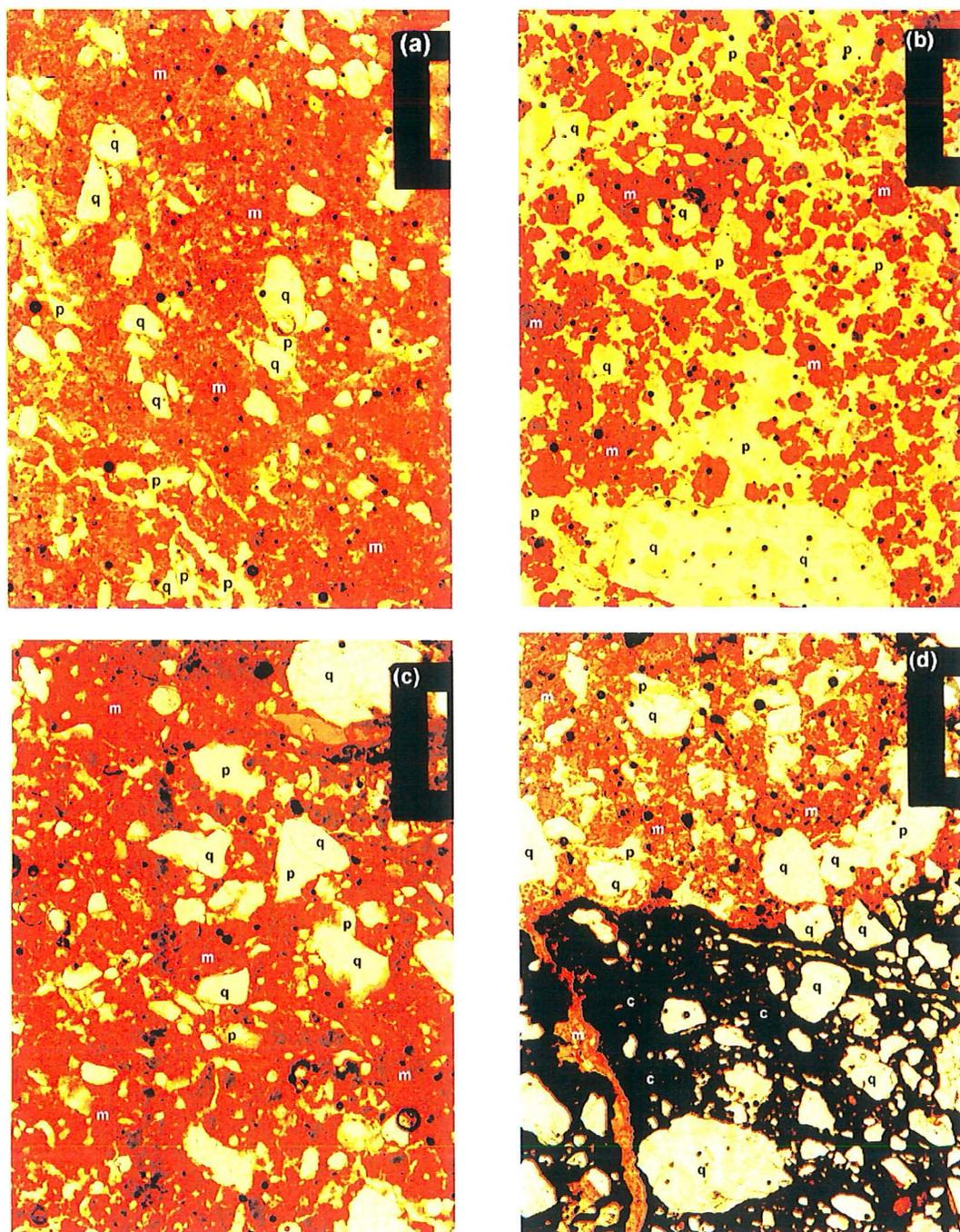


Figura 24 – Fotomicrografias : zona de porosidade menor (a) e maior (b) no horizonte Bt1 do PAd4. Horizonte Bt1 (c) do PAd5. Horizonte Btcf1 (d) do FFcd. Comprimento longitudinal interno da barra = 200  $\mu\text{m}$ . c-matriz do nódulo, m -matriz plásmica, p-poro, q-quartzo.

tipo porfirica. O grau de pedalidade é moderado nas áreas de menor porosidade, contudo, apresenta-se fortemente desenvolvido onde a porosidade é maior e podem ser encontrados microagregados granulares e blocos subangulares. Ferrãs (muito pouco) podem ser observados na lâmina, porém os argilãs têm ocorrência freqüente.

O esqueleto do horizonte Btcf1 no Plintossolo Pétrico Concrecionário (FFcd) não difere das demais amostras analisadas. Pode-se observar que, até nos nódulos, a fração grosseira é constituída predominantemente por quartzos pobremente selecionados, subarredondados, mas alguns se apresentam arredondados (Figura 24d). A distribuição relativa é classificada como porfirica, onde o esqueleto está inserido na massa plásmica, contudo, pode-se observar que o plasma chega a preencher algumas fissuras que ocorrem nos nódulos. Argilãs podem ser encontrados nesta lâmina, contudo, numa ocorrência classificada como muito pouco.

Nos horizontes superficiais, onde os teores de argila são baixos (Tabela 3), há uma pequena proporção de plasma, ocasionando uma porosidade predominantemente por empacotamento, como pode ser visto no Ap (Figura 20a e 21a) do Argissolo Acinzentado (PACd) e do Argissolo Amarelo duripânico (PAd1)

A elevada porosidade da camada superficial é contrastante com o que é encontrado nos demais horizontes de acumulação de argila (B textural), onde o plasma ocorre de forma mais densa e a matriz apresenta-se predominantemente com baixa porosidade e fraco grau de pedalidade (Figuras 20 a 24).

Nos horizontes texturais, no entanto, a caracterização é diferenciada na zona que ocorrem poros mais desenvolvidos e formação de agregados, aumentando-se o grau de pedalidade, como se observa no Btmc (Figura 21c), Btmx (Figura 22b), Btx (Figura 22c) e Bt (Figura 22d) do perfil PAd1 (PAd1) e nas lâminas dos perfis PAd2, PAd3, PAd4 e PAd5 (Figuras 23 e 24). Embora seja observada a presença de microagregados granulares nas lâminas destes solos predominantemente caulíníticos, Ferreira et al. (1999), trabalhando com Latossolos, concluíram que a estrutura em blocos está associada a solos de mineralogia caulínítica, enquanto a estrutura granular está relacionada a solos gibbsíticos.

Como foi citado na caracterização micromorfológica, os argilões estão presentes nestes horizontes, inclusive no Bt do PAd1, que está a uma grande distância da superfície do perfil (230-360 cm). Fedoroff & Eswaran (1985) justificam que, em áreas de condições hidromórficas, os argilões diminuem nas camadas mais profundas, contudo, podem ser encontrados em grandes profundidades dentro da zona de intemperismo.

O hidromorfismo temporário, seguido do processo de secagem na estação seca, causa condições favoráveis para dispersão e posterior formação de cutões e pontes de argilas, causando endurecimento no solo (Lamotte et al., 1997a, b e Singer et al., 1992) e sendo determinante na formação de fragipões (Attou & Bruand, 1998 e James et al., 1995).

Nas lâminas dos horizontes de máxima cimentação, onde os duripões ocorrem de forma dominante (Tabela 2) e que correspondem aos horizontes Btm1 (Figura 20b) do Argissolo Acinzentado (PACd), Btmc (Figura 21b) e Btm (Figura 21d) do Argissolo Amarelo duripônico (PAd1), observa-se que a porosidade é muito restrita. Baixa porosidade e predominância do plasma na lâmina também foram encontradas no duripão estudado por Moreau (2001) na região dos Tabuleiros Costeiros. Outros atributos que se assemelham são distribuições porfíricas e poros, predominantemente, em forma de cavidades.

Os poucos canais e fissuras que ocorrem nestas camadas de duripões do PACd e PAd1, normalmente apresentam preenchimento denso e completo de argilões e ferrões. A cor amarela dos argilões às vezes é intercalada por um material vermelho-escuro, característico dos ciclos formadores de argilões – ferrões, encontrado por Melo & Santos (1996) no Espodossolo dos Tabuleiros de Pernambuco.

A incidência destes cutões é menor nos horizontes mais profundos, o que representa uma situação inversa do que foi encontrada por Moreau (2001). No entanto, o perfil analisado pela pesquisadora está sob condições (depressão com drenagem impedida) de estabilização/formação de duripões, com a cimentação ocorrendo nas camadas mais profundas.

Com a mineralogia caulínica sendo dominante no material da Formação Barreiras (Duarte et al., 2000; Jacomine, 1996; Melo et al., 2002a e Ribeiro, 1998), é

natural que os argilões que ocorrem nos solos dos Tabuleiros Costeiros sejam constituídos predominantemente por caulinita, como determinado por Melo & Santos (1996). Entretanto, além da argila silicatada, Allen (1985) descreve a presença de minerais de calcedônia, opala e calcita nos cutões descritos em duripã cimentado por sílica e carbonato de cálcio.

Os ferrões, que para Fedoroff & Eswaran (1985) podem caracterizar um material plúntico com impregnação simples, apresentam uma transição difusa para a matriz do solo, como a descrita por Duarte et al. (2000) em solos do Espírito Santo. No entanto, transições de forma mais bruscas também podem ser observadas nos horizontes deste estudo (Figuras 21b e 21d), assim como extensões para a matriz do solo.

Ferrões e associações ferrões-argilões também podem atuar com cutões de revestimento em alguns grãos do material grosseiro, aparecendo principalmente nos horizontes Btmc, Btm e Btmx. Feições semelhantes foram encontradas no duripã dos Tabuleiros descrito por Carvalho (2001) e podem ser melhor visualizadas nas Figuras 21b, 21c e 21d.

Nas poucas cavidades, canais e fissuras que não sofreram um preenchimento completo de argilões e ferrões, normalmente ocorre uma feição bastante incomum (Figura 25), que pode ser observada somente com os nicóis cruzados. Esta feição ocorre de forma menos freqüente no horizonte Btmx do PAd1 e do PAd2.

Na Figura 25a, referente à lâmina do duripã no Argissolo Acinzentado (PACd), encontra-se um grande poro que ocorre numa matriz de plasma denso e distribuição relativa porfirica. A imagem do poro na Figura 25b foi obtida com um aumento maior e usando-se nicóis cruzados, pois, assim, pode-se observar melhor as diferenças em relação aos poros dos horizontes não cimentados (Figuras 25c e 25d).

Pode-se verificar que (Figura 25), quando se cruza os nicóis, as características que os poros apresentam são bem distintas. Diferentemente do que acontece nos horizontes não cimentados (Figura 25d), as feições no poro do duripã apresentam manchas acinzentadas com propriedades de birrefringência. Estruturas com aspectos criptocristalinos ocorrem nas bordas do poro e se desenvolvem em direção à área central do poro.

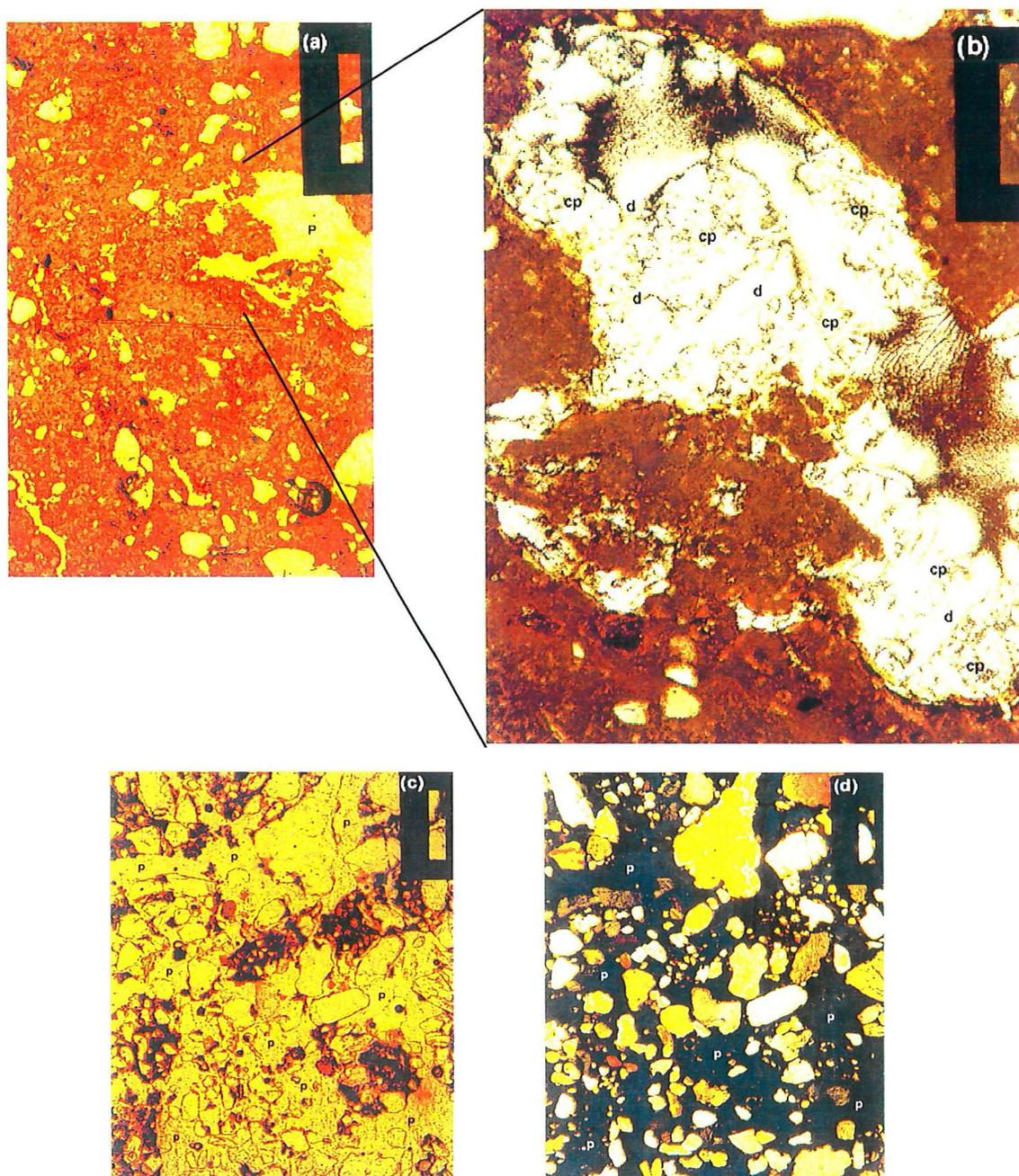


Figura 25 – Fotomicrografias do Argissolo Acinzentado - PACd. (a) Camada de duripã com a presença de um grande poro-P. (b) Destacando-se a imagem ampliada do poro-P, obtida com nicóis cruzados. (c) Horizonte Ap com luz plana e (d) com nicóis cruzados. Comprimento longitudinal interno da barra de 800  $\mu\text{m}$  em (b) e de 200  $\mu\text{m}$ . em (a), (c) e (d). cp-feições criptocristalinas, d-deposições de ferrãs-argilãs, p-poro.

Há indícios de que estas feições também causam restrições à dinâmica da água nestes poros, permitindo que o fluxo de água ocorra somente entre as estruturas (criptocristalinas), onde existem deposições de um fino material constituído, provavelmente, de argila.

Ao atuarem como obstáculos ao fluxo da água, estas estruturas, que podem estar relacionadas com o acúmulo de material não cristalino, reduzem o volume útil do poro e agravam o problema da baixa porosidade que as camadas de duripãs apresentam.

A dinâmica da água é muito importante no processo de degradação dos duripãs, porque os elementos determinados como amorfos, que aparecem com teores mais elevados principalmente nestes horizontes (Tabela 7), podem ser perdidos mais facilmente por lixiviação, pois os materiais não cristalinos e de baixa cristalinidade são mais solúveis do que os cristalinos (Alexandre et al. 1997; Clarke, 2003 e Oehler, 1979), sendo a sílica amorfa considerada pelo menos 10 vezes mais solúvel que o quartzo (Drees et al., 1989).

Esta relação *fluxo de água x solubilidade de amorfos* pode justificar a ausência, ou a baixa incidência, das feições criptocristalinas em alguns poros do duripã. Isto acontece nas zonas que estes horizontes têm uma porosidade maior, como se apresenta o Btmc da Figura 21b. A porosidade encontra-se mais interconectada, principalmente devido à ocorrência de canais e fissuras, permitindo um maior fluxo de água, porém, também se observa que nesta área a massa plásmica passa por transformações originando microagregados granulares e blocos subangulares. Estas condições são importantes no processo de degradação dos horizontes cimentados, pois originam uma melhor agregação e, devido à maior dinâmica da água, uma maior lixiviação de agentes cimentantes (amorfos).

Portanto, as análises sugerem que estes duripãs estejam em processo de degradação, o que também já foi relatado por Boulet et al. (1998) e por Ucha (2002), respectivamente em áreas dos Tabuleiros de Pernambuco e da Bahia.

#### 4.8.2 Microscopia eletrônica de varredura

A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi empregada somente em alguns horizontes, buscando-se um maior esclarecimento de alguns resultados obtidos em outras análises.

O fragmento de duripã do horizonte Btm1 do Argissolo Acinzentado (PACd), analisado no MEV, mostra grãos de quartzo inseridos numa matriz bastante compacta (Figura 26a). No torrão do horizonte Bt1 do perfil PAd5, que não apresenta duripã, observa-se que a matriz, onde se inserem os quartzos, encontra-se menos densa (Figura 26b).

No entanto, a microanálise de raios-x por espectrometria de energia dispersiva (EDS) indica que a composição da matriz do duripã (Btm1) é bem semelhante à encontrada na matriz do Argissolo Amarelo (PAd5) sem duripã e fragipã (Bt1). Em ambos os casos, os espectros normalmente mostram uma intensidade de contagem do silício ligeiramente superior em relação à contagem do alumínio, como pode ser observado na Figura 26c, enquanto o espectro do quartzo é apresentado na Figura 26d.

Nestes solos predominantemente cauliníticos é comum se encontrar pico de silício ligeiramente superior ao de alumínio, devido ao padrão de identificação da caulinita (Welton, 1984).

Nos perfis de solos dos Tabuleiros estudados por Moreau (2001), o pico do silício é predominantemente maior que o do alumínio, às vezes com o dobro da contagem. Porém, segundo a autora, esta situação não indica que esteja ocorrendo incremento adicional de sílica naqueles solos, pois estes resultados são contraditórios em relação aos obtidos pelo mapeamento dos elementos químicos.

No procedimento adotado por Welton (1984) há uma maior precisão na análise, pois a identificação da caulinita é feita isoladamente. Entretanto, na metodologia adotada Moreau (2001), a determinação na análise pontual pode ser de uma associação de minerais, assim, o trabalho sugere a diferenciação no procedimento também é um fator para as diferenças entre os espectros de silício e alumínio.

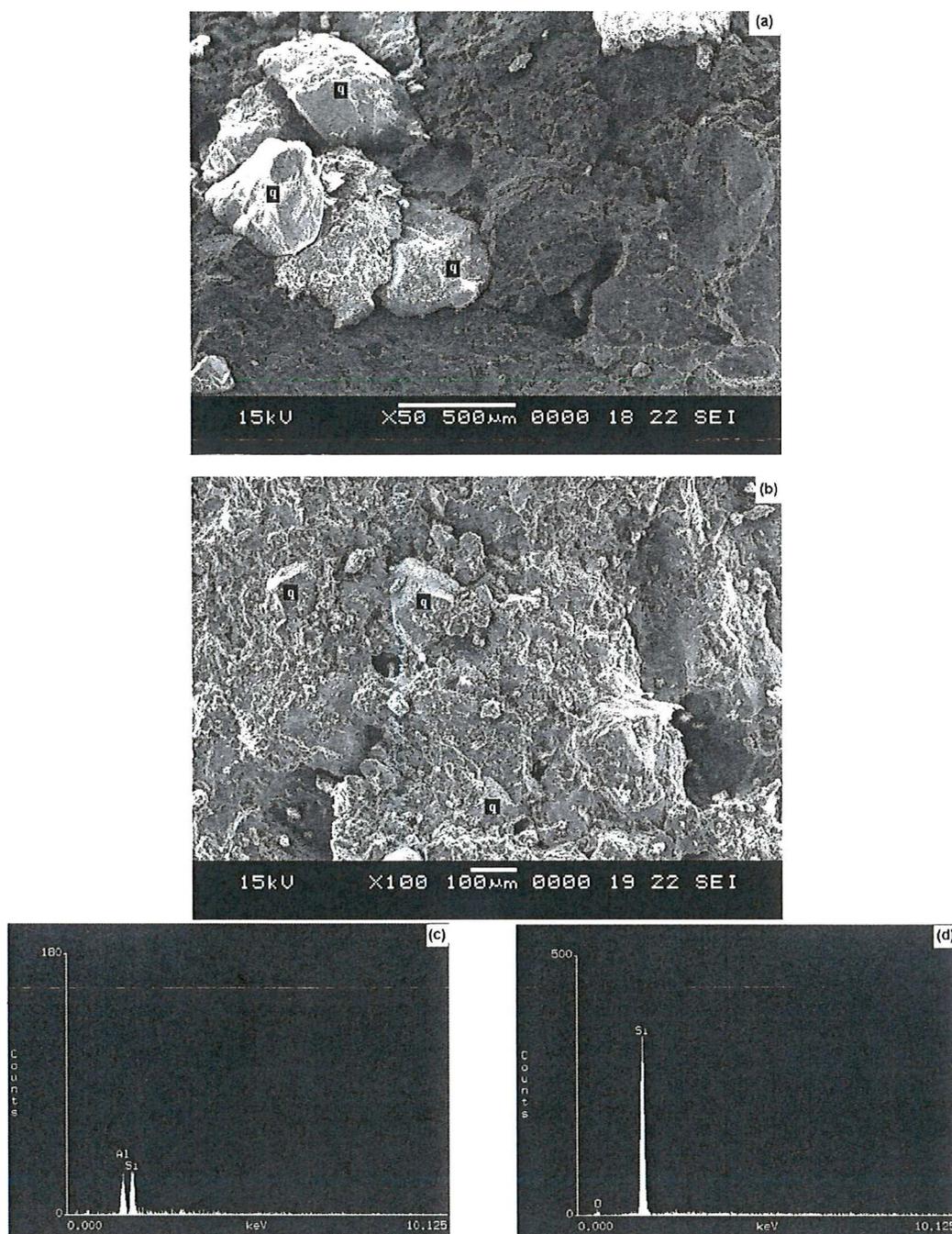


Figura 26 – Fotomicrografias: (a) horizonte Btm1 do Argissolo Acinzentado - PACd e (b) horizonte Bt1 do Argissolo Amarelo distrófico plântico – PAD5, com grãos de quartzo (q) inseridos na matriz do solo. Espectros representativos de matriz (c) e do quartzo (d) obtidos por EDS. Intensidade em contagens de energia em keV.

Analisando-se a matriz do horizonte Btm1 do Argissolo Acinzentado (PACd), com ampliações de 4.000 e 10.000 vezes, são obtidas as imagens das Figuras 27a e 27b, onde não se observam minerais de placas hexagonais, como a caulinita de elevada cristalinidade descrita por Dixon (1989). No entanto, este mineral pode chegar a apresentar forma tubular, quando o grau de desordem estrutural é alto (Singh & Gilkes, 1992), já Melo et al. (2001) indicam que o elevado intemperismo pode causar a perda das faces euédricas da caulinita. Assim, diversas feições da caulinita foram encontradas no material da Fm. Barreiras estudado por Melo et al. (2002c), no qual quase a metade das caulinitas apresentava formas alongada e circular, enquanto que menos de 7% apresentavam formas hexagonais.

Da amostra indeformada do Btm1 (PACd), impregnada com resina para confecção de lâmina delgada, extraiu-se um pequeno bloco que foi analisado no MEV. A Figura 28a é uma fotomicrografia da área que abrange um poro (cor escura) onde foram efetuadas análises pontuais por EDS. O espectro da análise na matriz (Figura 28b) apresenta elevadas proporções de silício e alumínio, enquanto o ferro e o titânio aparecem com contagens mais baixas.

O padrão da contagem de Si ligeiramente superior à de Al permanece neste espectro (Figura 28b). O aparecimento do Ti (Figura 28e), que nem sempre é observado nas microanálises, pode está relacionado com a ocorrência de anatásio, que é detectado na difratometria de raios-x (Figura 18), embora Melo et al. (2002c) relatem que este elemento pode estar adsorvido fazendo parte da estrutura da argila devido à substituição isomórfica. No caso do ferro, a mineralogia não indicou a ocorrência de óxidos cristalinos, porém a extração pelo ataque sulfúrico (Tabela 6) mostra que o teor deste elemento é de 12,8 g kg<sup>-1</sup>. Outro fator que pode contribuir para a detecção de ferro é indicado pela micromorfologia, pois, como foi descrito, cutãs contendo ferro ocorrem em alguns poros dos duripãs e chegam a se estender para a matriz do solo.

As análises por EDS realizadas no poro (Figura 28a) deste bloco de duripã (Btm1 do PACd) mostram que a composição apresenta diferenciações. Nas áreas indicadas pelo algarismo 1, o espectro não indica a ocorrência de algum elemento ou apresenta uma baixa contagem de Al (Figura 28c). Espectros com contagem somente de

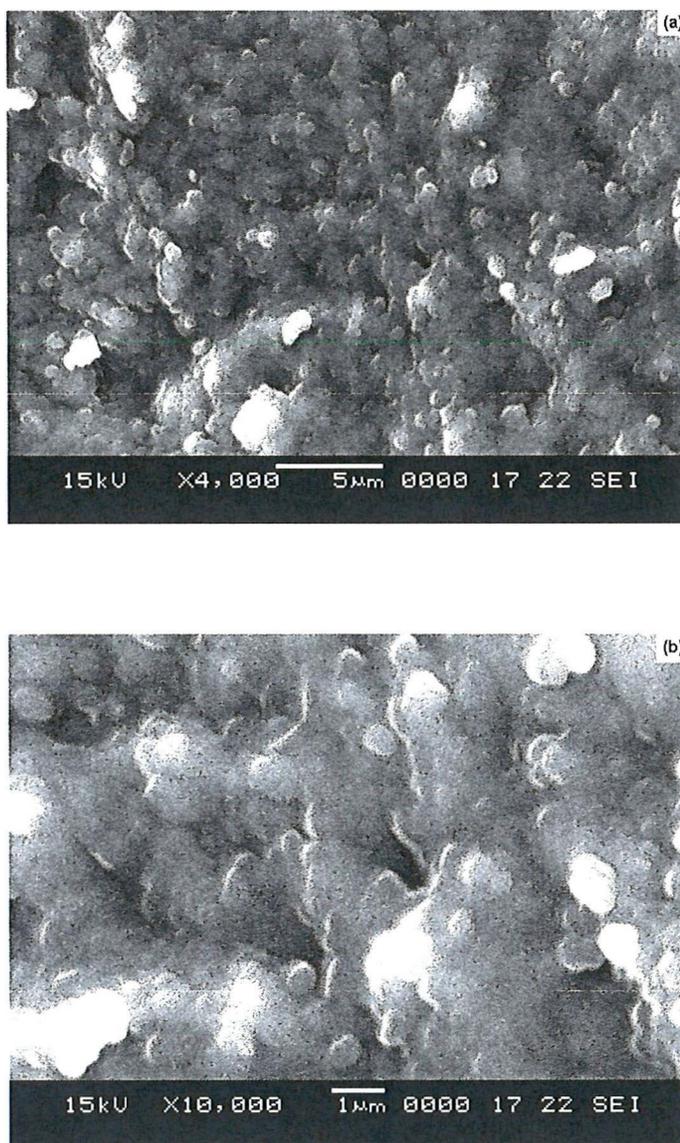


Figura 27 – Fotomicrografias da matriz caulínica do horizonte Btm1 do Argissolo Acinzentado - PACd com aumentos de 4.000 (a) e 10.000 (b) vezes.

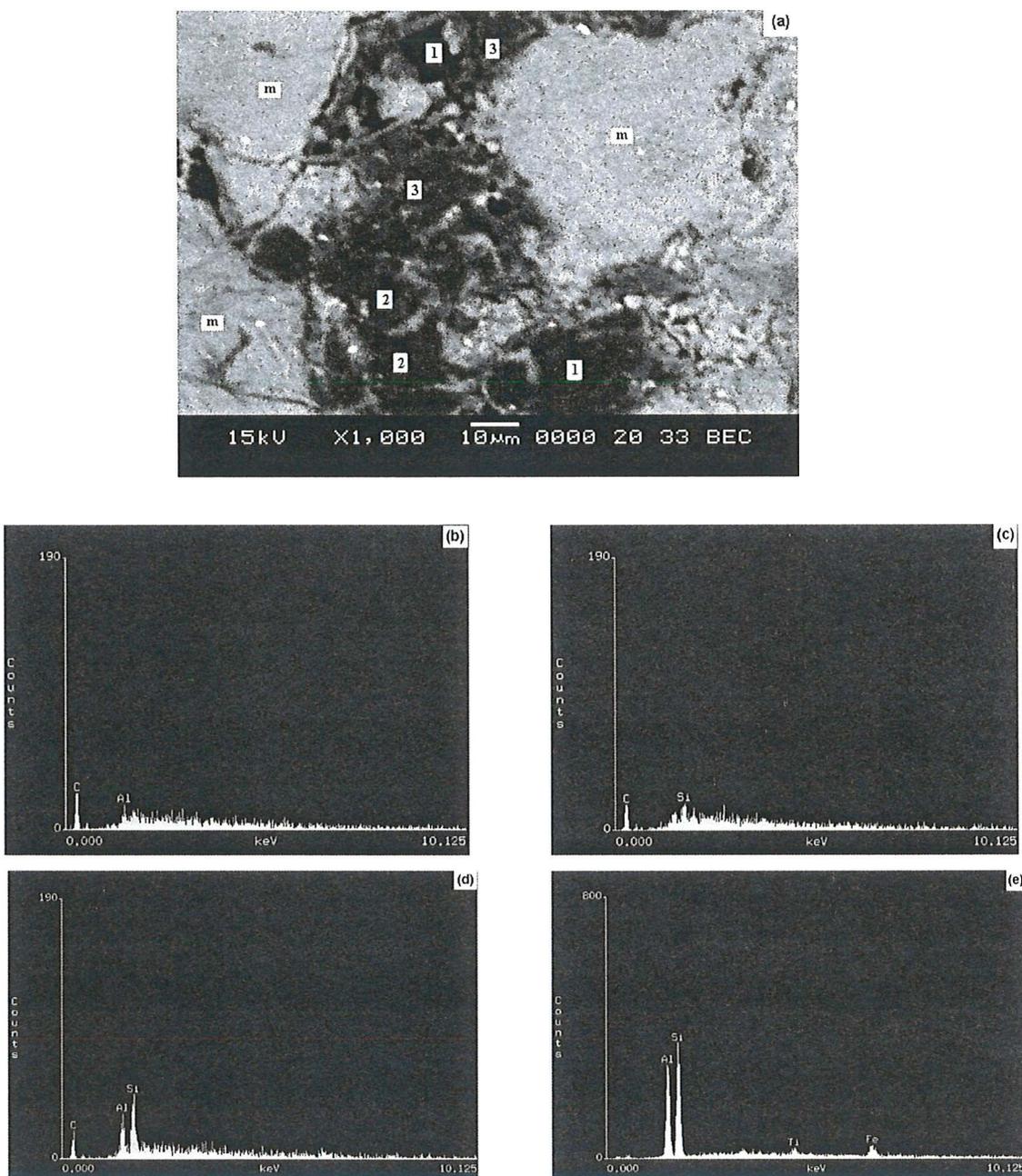


Figura 28 – Fotomicrografia (a) do bloco do horizonte Btm1 - PACd, com a matriz (m) densa apresentando poro (cor escura) com áreas de composição variada. Espectros representativos de matriz (b), e do poro nas áreas 1 (c), 2 (d) e 3 (e). Intensidade em contagens de energia em keV.

Si são obtidos nas áreas indicadas pelo número 2 (Figura 28d). Nas zonas identificadas pelo algarismo 3, aparecem contagens de Al, no entanto a proporção de Si é um pouco maior (Figura 28e).

A lâmina delgada do horizonte Btm1 (PA1) também foi analisada por MEV, utilizando-se uma zona previamente selecionada pela microscopia ótica, na qual foi demarcada a área de um poro que apresenta ferrãs. A fotomicrografia da área pode ser visualizada na Figura 29a. Na matriz permanece o padrão com contagens mais elevadas de Si e Al (Figura 29b). No poro são encontradas duas áreas com pequenas diferenciações no espectro (Figuras 29c e 29d), porém, ambas apresentam maiores proporções de Si do que Al. No espectro da área com ferrãs (figura 29e), além da mais alta intensidade do Fe, deve-se destacar o aparecimento de uma pequena contagem de Al.

Na seqüência de imagens obtidas com o mapeamento dos elementos na zona do poro (Figura 30a), observa-se a distribuição dos elementos na lâmina (Figuras 30b, 30c e 30d), retratando os dados obtidos com os espectros da Figura 29. A área dos ferrãs está bem marcada, contornando a parede do poro (Figura 30b), embora também se observe que o ferro está distribuído com baixa intensidade na matriz do solo.

O silício e o alumínio encontram-se bem distribuídos na matriz do solo. Porém, o Si se destaca nos grãos de quartzo e pode-se observar que, após a zona dos ferrãs, este elemento é que aparece em maior proporção no poro (Figura 30c). No entanto, na área de ocorrência dos ferrãs, o Al está mais concentrado do que o silício. Este fato pode estar relacionado com a substituição do Fe de alguns compostos pelo Al, este fenômeno isomórfico é descrito tanto para goethitas (Norrish & Taylor, 1961) como para hematitas (Shwertmann et al., 1977).

A zona da lâmina com um poro na camada de duripã (Figura 31a) do horizonte Btm1 – PACd, que apresenta feições de material criptocristalino (Figura 31b) descritas na microscopia ótica, também foi analisada na microscopia eletrônica (Figura 31c).

Na imagem obtida por MEV, que indica uma composição diferenciada no poro (Figura 32a), foram feitos mapeamentos dos elementos, nos quais pode-se observar maiores concentrações de silício (Figura 32b) do que de alumínio (Figura 32c), portanto,

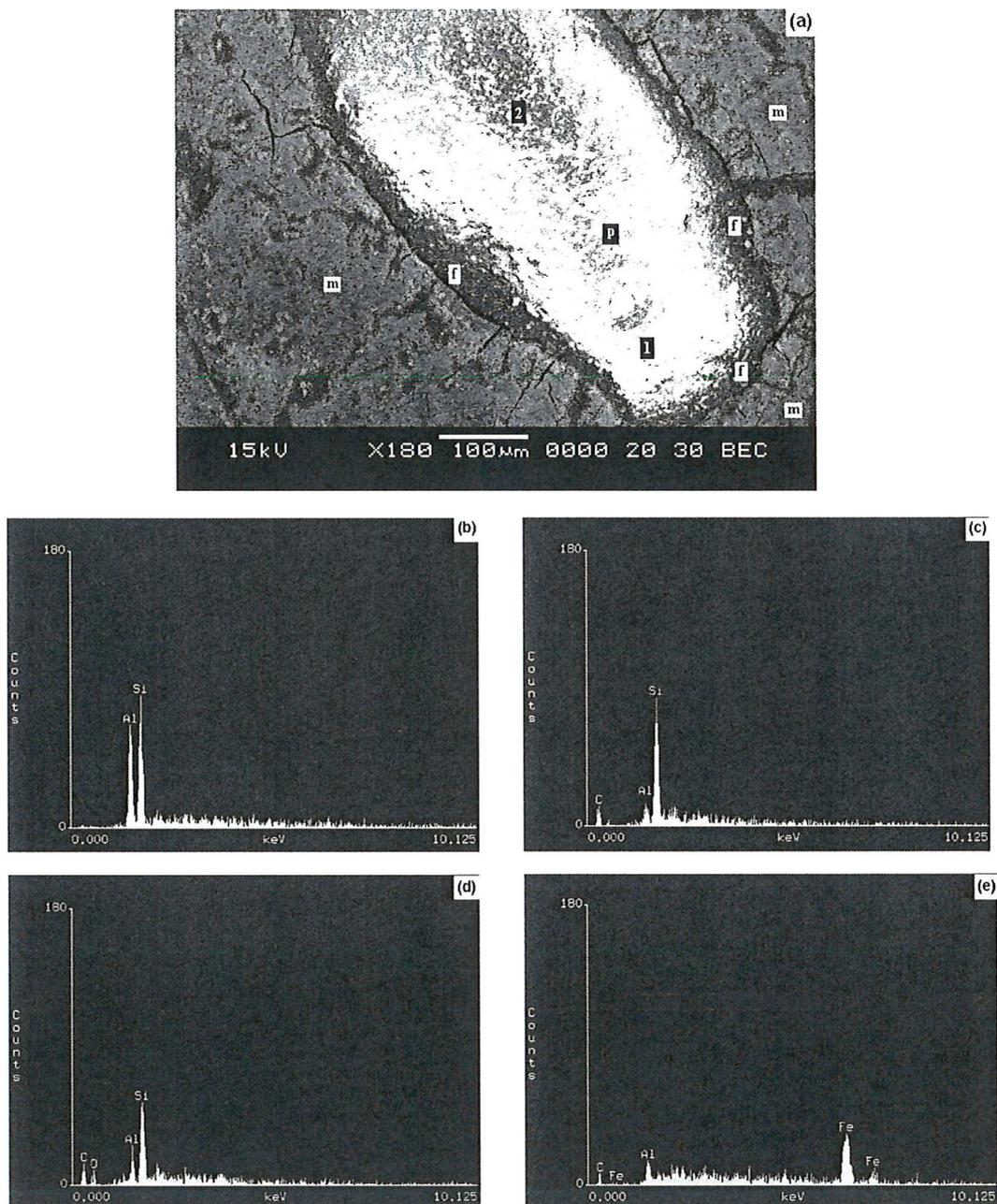


Figura 29 – Fotomicrografia (a) da lâmina do horizonte Btm1 - PACd, com a matriz -m densa apresentando um poro-p com ferrãs-f. Espectros representativos de matriz (b), da área 1 (c) e área 2 (d) do poro e da zona com ferrãs (e). Intensidade em contagens de energia em keV.

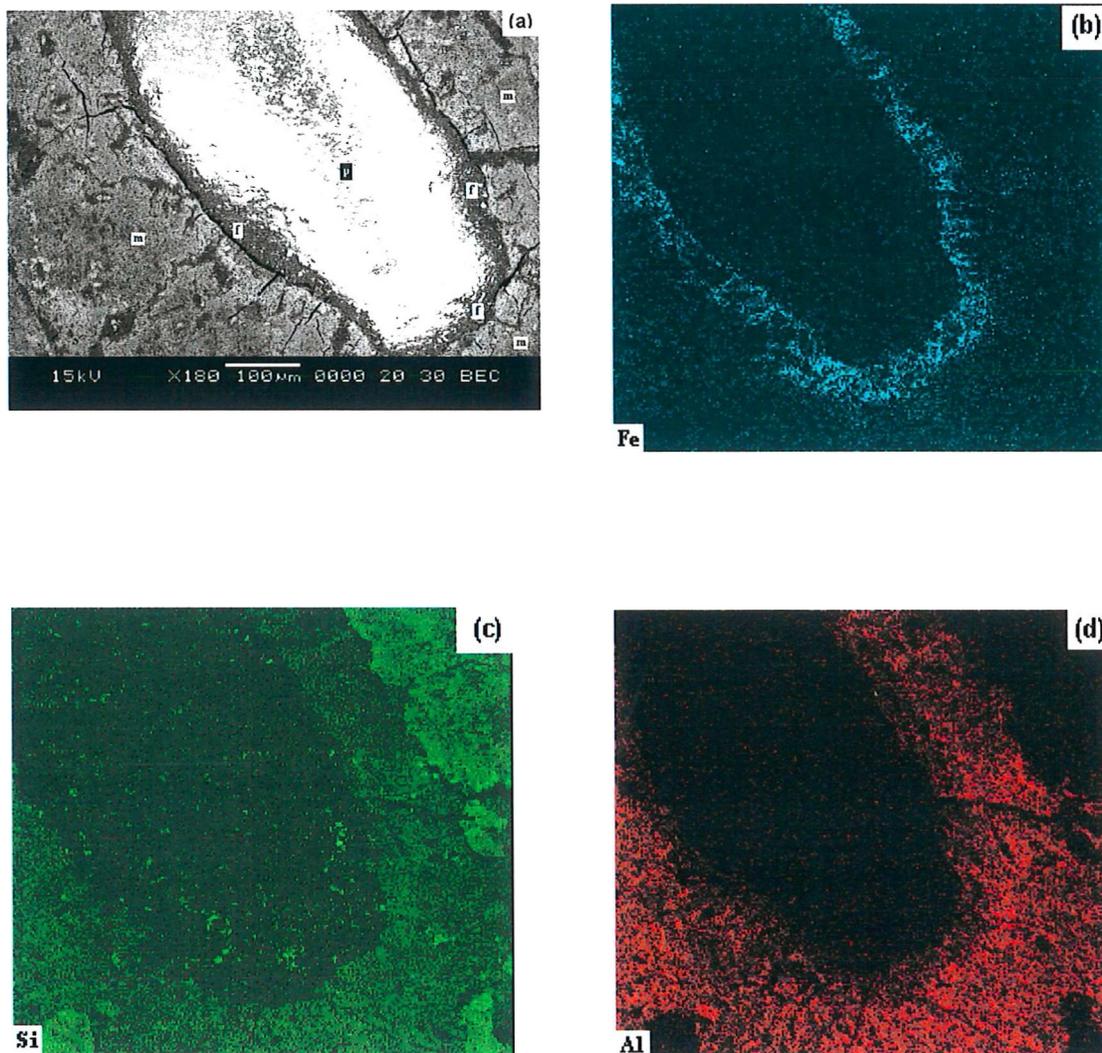


Figura 30 – Fotomicrografia (a) da lâmina do horizonte Bt<sub>m1</sub> - P0, com a matriz-m densa apresentando um poro-p com ferrãs-f e o respectivo mapeamento de ferro (b), silício (c) e alumínio (d).

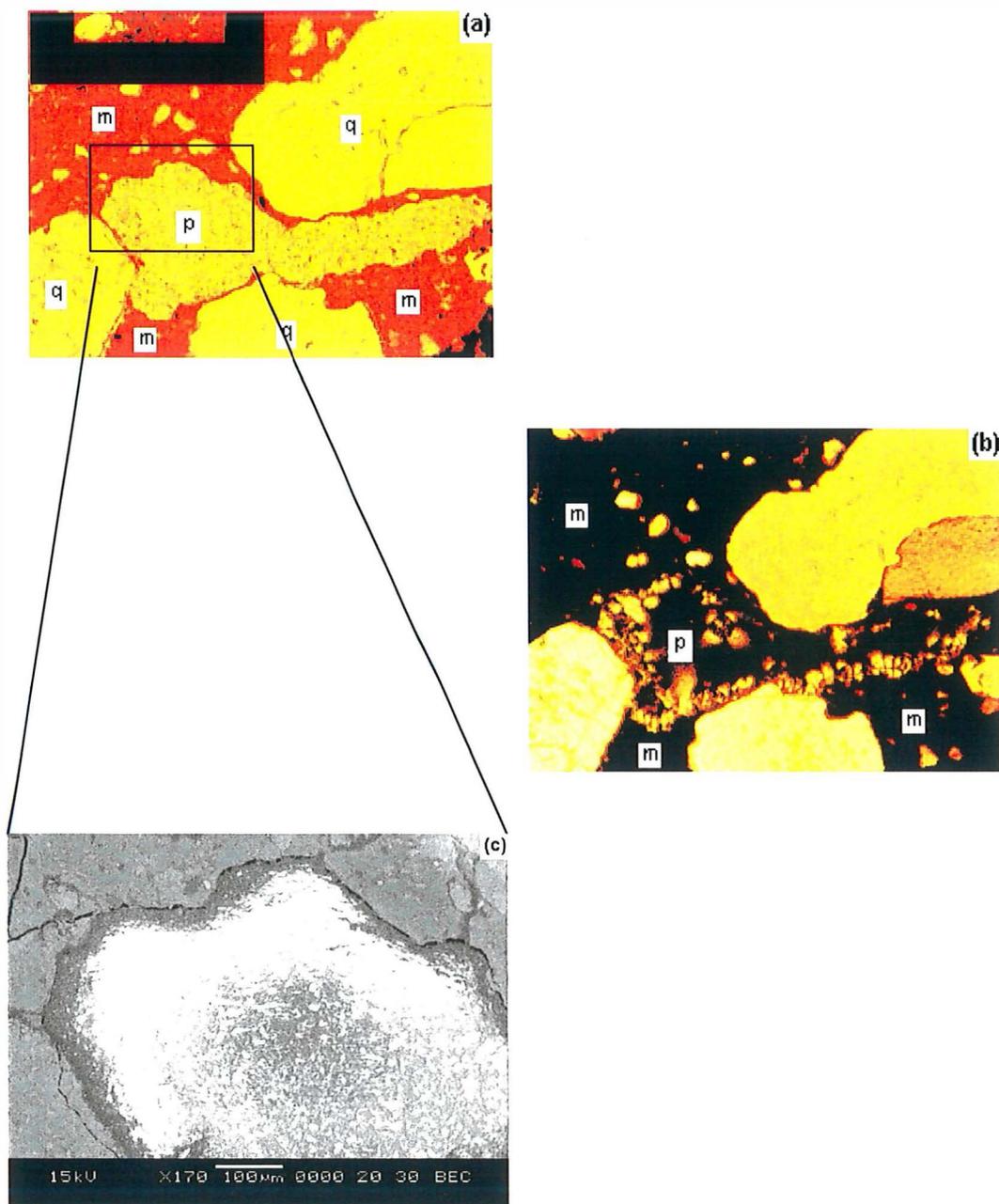


Figura 31 – Fotomicrografias da lâmina do horizonte Btm1 - P0 com luz plana (a) e nicóis cruzados (b) obtidas por microscopia ótica, com feições de material criptocristalino no poro. (c) Fotomicrografia com o detalhe do poro, obtido por MEV. m-matriz plásmica, p-poro, q-quartzo.

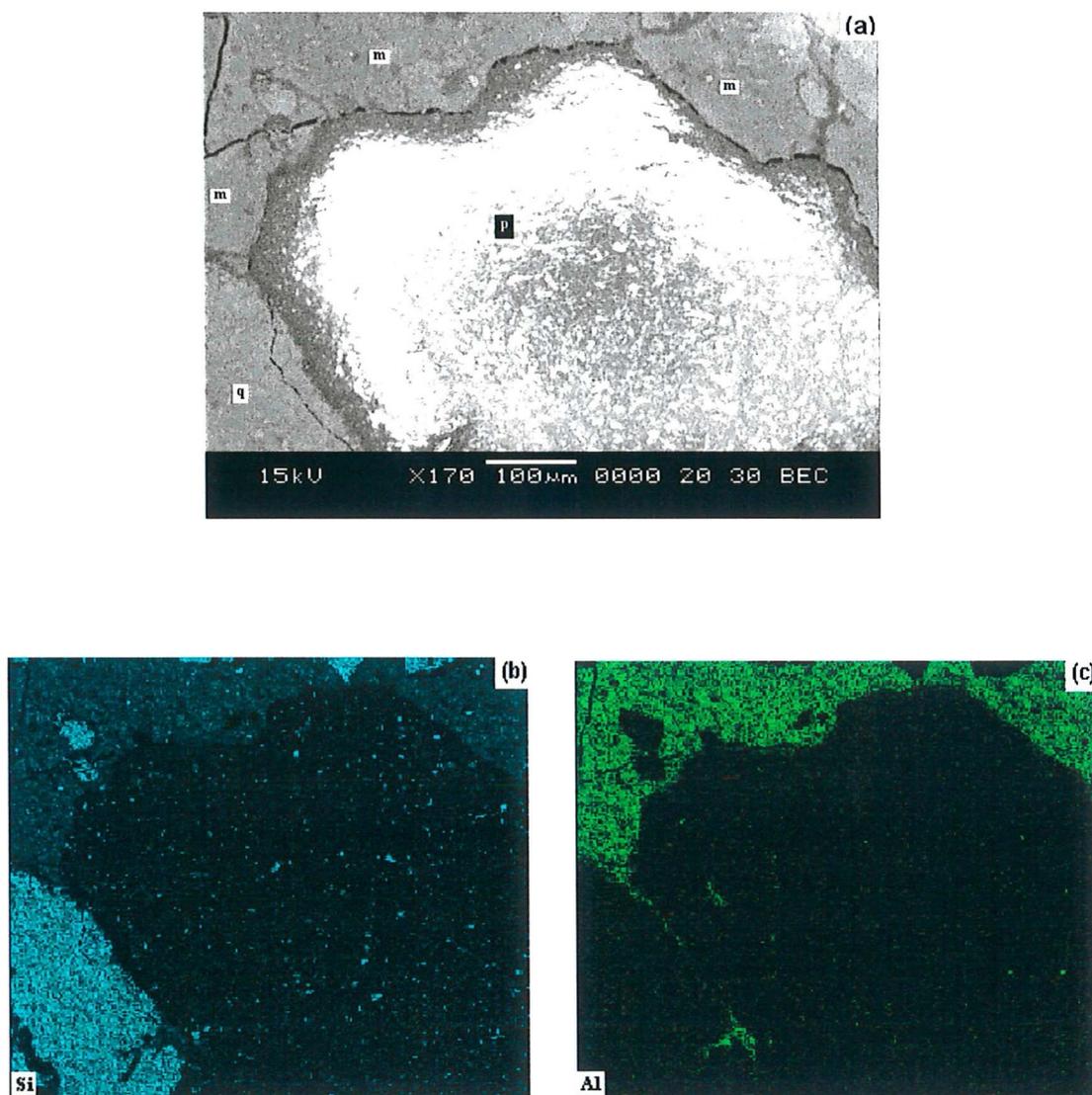


Figura 32 – Fotomicrografia (a) do poro na camada de duripã em lâmina do horizonte Btm1 – P0 e o respectivo mapeamento de silício (b) e alumínio (c). m-matriz, p-poro, q-quartzo.

há indícios de concentração preferencial do silício próximo às paredes dos poros. No entanto, Boulet et al. (1998) descrevem duripã com géis na borda dos poros, os quais apresentam composição variando de alumino-silicosa a aluminosa.

Como pequenas concentrações de sílica podem atuar como agente cimentante, pois esta substância não precisa formar uma matriz contínua (Uehara & Jones, 1972), as maiores concentrações de silício detectadas por MEV no presente estudo, associadas às feições de material criptocristalino identificadas na microscopia ótica, indicam que a sílica pode ter expressiva atuação na cimentação destas camadas de duripãs.

#### **4.9 Considerações Finais**

Com a ocorrência de camadas duripãs próximos à superfície do solo, causando expressiva restrição ao desenvolvimento radicular e prejudicando intensamente a dinâmica da água no solo, sugere-se a inclusão do caráter duripânico no 4º. nível categórico (subgrupos), nas classes dos Argissolos Acinzentados e Argissolos Amarelos. Entretanto, devido à intensidade deste caráter, deve-se analisar a possibilidade de incluí-lo já no 3º. nível categórico (grandes grupos).

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados, obtidos com as análises dos solos desta toposseqüência, indicam que as camadas de duripãs estudadas apresentam processo de degradação e permitem fazer algumas conclusões específicas que serão descritas a seguir.

- Os processos de acumulação de argila, com uma significativa redução dos poros interconectados e da porosidade em geral, assim como processos de acumulação de compostos químicos estiveram associados aos mecanismos que atuaram na formação dos duripãs.
- Os teores mais elevados de compostos amorfos de alumínio e silício nas camadas cimentadas mostram que estes constituintes são determinantes na cimentação dos duripãs.
- O maior teor de alumínio do que de sílica amorfa, extraídos pelo oxalato ácido de amônio, indica que estes duripãs apresentam uma maior concentração do alumínio como agente cimentante.
- Os resultados das análises via microscopia (ótica e eletrônica) sugerem a participação da sílica como agente cimentante com acumulação preferencial nas bordas dos poros dos duripãs.
- A análise mineralógica mostra que os horizontes possuem uma composição semelhante, porém a mineralogia caulínica favorece a formação de uma matriz mais densa observada nos duripãs.
- O desenvolvimento de uma porosidade mais interconectada e a formação de microagregados indicam uma melhor agregação, favorecendo o fluxo de água e a lixiviação de elementos que atuam na cimentação, permitindo um processo de degradação nas camadas cimentadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-WAHAB, A.; SALEM, A. M. K.; McBRIDE, E. F. Quartz cement of meteoric origin in silcrete and nonsilcrete sandstones, Lower Carboniferous, western Sinai, Egypt. **Journal of African Earth Sciences**, v.27, n.2, p.277-290, 1998.
- ALEXANDRE, A.; MEUNIER, J.D.; COLIN, F. et al. Plant impact on the biogeochemical cycle of silicon and related weathering processes. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v.61, n.3, p.677-682, 1997.
- ALLEN, B.R. Micromorfology of Aridisols. In: DOUGLAS, L.A.; THOMPSON, M.L. (Ed.). **Soil micromorfology and soil classification**. Madison: Soil Science Society of America, 1985. cap.10, p.197-216.
- ARAÚJO FILHO, J. C.; CARVALHO, A.; SILVA, F.B.R. Investigações preliminares sobre a pedogênese de horizontes coesos em solos dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste do Brasil. In: CINTRA, L. F. D.; ANJOS, J. L.; IVO, W. M. P. M. (Ed.). **Workshop coesão em solos dos Tabuleiros Costeiros**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p.123-142.
- ARAÚJO FILHO, J.C.; SILVA, F.B.R.; SILVA, S.S.L. Solos dos Tabuleiros Costeiros: horizontes coesos e cimentados (compact disc). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 27., Brasília, 1999. **Resumos**. Brasília: SBCS, 1999.
- AREF, M. A. M. Classification and depositional environments of Quaternary pedogenic gypsum crusts (gypcrete) from east of the Fayum Depression, Egypt. **Sedimentary Geology**, v.155, n.1/2, p.87-108, 2003.

- ATTOU, F.; BRUAND, A. Experimental study of 'fragipans' formation in soils. Role of both clay dispersion and wetting-drying cycles. **Earth & Planetary Science**, v.326, n.8, p.545-552, 1998.
- BAHIA. Centro de Planejamento da Bahia. **Atlas climatológico do Estado da Bahia: análise espacial da pluviosidade**. Salvador, 1976. 181p.
- BIGARELLA, J.J. The Barreiras Group in Northeastern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.47, p.365-393, 1975. Suplemento.
- BIGARELLA, J.J.; ANDRADE, G.O. Considerações sobre a estratigrafia dos sedimentos cenozóicos em Pernambuco (Grupo Barreiras). **Arquivos do Instituto de Ciência da Terra**, v.2, p.2-14, 1964.
- BLANK, R. R.; FOSBERG, M. A. Duripans of Idaho, USA – in situ alteration of eolian dust (loess) to an opal-a/X-ray amorphous phase. **Geoderma**, v.48, p.131-149, 1991.
- BLANK, R. R.; COCHRAN, B.; FOSBERG, M.A. Duripans of southwestern Idaho: Polygenesis during the quaternary deduced through micromorphology. **Soil Science Society of America Journal**, v.62, n.3, p.701-709, 1998.
- BOLETIM INFORMATIVO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, Viçosa, v.26, n.2, 2001. 26p.
- BOULET, R. Análise estrutural da cobertura pedológica e cartografia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 21., Campinas, 1988. **Anais**. Campinas: SBCS, 1988. p.79-90.
- BOULET, R.; FRITSCH, E.; FILIZOLA, H.F.; ARAÚJO FILHO, J.C; LEPRUN, J. C.; BARRETO, F.; BALAN, E. & TESSIER, D. Iron bands, fragipans and duripans in the northeaster plateaus of Brazil – properties and genesis. **Canadian Journal of Soil Science**. v.78, n.3, p.519-530, 1998.

- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado da Paraíba.** Recife: SUDENE, 1972. 2v. (DPP. Boletim Técnico, 15. SUDENE, Série Pedologia, 8).
- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco.** Recife: SUDENE, 1973a. 2v. (DPP. Boletim Técnico, 26. SUDENE, Série Pedologia, 14).
- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado Do Ceará.** Recife: SUDENE, 1973b. 2v. (DPP. Boletim Técnico, 28. SUDENE, Série Pedologia, 16).
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. **Projeto RADAMBRASI: Folhas SC. 24/25 Aracaju/Recife; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra.** Rio de Janeiro, 1983. 856p. (Levantamento de Recursos Naturais, 30).
- BREWER, R. **Fabric and mineral analysis of soils.** New York: Robert E. Krieger Publ., 1976. 482 p.
- BRYANT, R.B. Physical processes of fragipan formation. In: SMECK, N.E.; CIOLKOSZ, E.J. **Fragipans: their occurrence, classification, and genesis.** Madison: Soil Science Society of America, 1989. p.141-150. (SSSA Special Publication, 24).
- BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A. et al. **Handbook for soil thin section description.** London: Waine Research, 1985. 153p.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A. et al. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas.** Campinas: Instituto Agronômico, 1986. 94p. (IAC. Boletim Técnico, 106)

- CARVALHO, C.C.N. Gênese e transformação de solos em um Tabuleiro do Recôncavo Baiano. Salvador, 2001. 116p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia.
- CHADWICK, O. A.; HENDRICKS, D. M.; NETTLETON, W. D. Silica in duric soils: I. A depositional model. **Soil Science Society of America Journal**, v.51, n.2, p.975-982, 1987a.
- CHADWICK, O. A.; HENDRICKS, D. M.; NETTLETON, W. D. Silica in duric soils: II. Mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, v.51, n.2, p.982-985, 1987b.
- CHARTRES, C.J.; NORTON, L.D. Micromorphological and chemical properties of Australian soils with hardsetting and duric horizons. In: INTERNATIONAL WORKING MEETING ON SOIL MICROMORPHOLOGY, 9., Townsville, 1992. **Soil micromorphology: studies in management and genesis; proceedings**, edited by A.J. Ringrose-Voase and G.S. Humphreys. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.825-834. (Developments in Soil Science, 22)
- CHARTRES, C.J.; KIRBY, J.M.; RAUPACH, M. Poorly ordered silica and aluminosilicates as temporary cementing agents in hard-setting soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.54, p.1060–1067, 1990.
- CINTRA, F. L D.; LIBARDI, P. L.; SILVA, A. P. da. Tabuleiros Costeiros do Nordeste do Brasil: uma análise dos efeitos do regime hídrico e da presença de camada coesas nos solos. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, n.2, p.77-80, 1997.
- CLARKE, J. The occurrence and significance of biogenic opal in the regolith. **Earth-Science Reviews**, v.60, n.3-4, p. 175-194, 2003.

- COSTA, J.B.S.; BORGES, M.S.; BEMERGUY, R.L. et al. Evolução cenozóica da região de Salinópolis, Nordeste do Estado do Pará. **Geociências**, v.12, n.2, p.373-396, 1993.
- DeKIMPE, C.R.; BARIL, R.W.; RIVARD, R. Characterization of a toposequence with a fragipan: the Leeds-Ste Marie-Brompton series of soils, Province of Quebec. **Canadian Journal of Soil Science**, v.52, p.135-150, 1972.
- DEMATTE, J. L. I.; MAZZA, J. A.; DEMATTE, J. A. M. Caracterização e gênese de uma topossequência Latossolo Amarelo – Podzol originado de material da Formação Barreis – Estado de Alagoas. **Scientia Agricola**, v.53, n.1, p.20–30, 1996.
- DIETZEL M. Dissolution of silicates and the stability of polysilicic acid. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v.64, n.19, p.3275–3281, 2000.
- DIXON, J.B. Kaolin and serpentine group minerals. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Ed.). **Minerals in soil environments**. 2.ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. cap.10, p.467-525.
- DREES, L.R.; WILDING, L.P.; SMECK, N.E. et al. Silica in soils: quartz and disordered silica polymorphs. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Ed.). **Minerals in soil environments**. 2.ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. cap.19, p.913-974.
- DUARTE, M.N.; CURI, N.; VIDAL PÉREZ, D. et al. Mineralogia, química e micromorfologia de solos de uma microbacia nos Tabuleiros Costeiros do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.6, p.1237-1250, 2000.
- DUNCAN, M.M.; FRANZMEIER, D.P. Role of free silicon, aluminum, and iron in fragipan formation. **Soil Science Society of America Journal**, v.63, p.923-929, 1999.

EASH, N. S.; SANDOR, J. A. Soil chronosequence and geomorphology in a semiarid valley in the andes of Southern Peru. **Geoderma**, v.65, n. 1/2, p.59-79, 1995.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Soil Survey Division. Soil Conservation Service. Soil Survey Staff. **Soil taxonomy**: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Washington, 1975. 754p. (USDA. Agriculture Handbook, 436).

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Soil Survey Division. Soil Conservation Service. Soil Survey Staff. **Soil classification**: a comprehensive system.; 7th approximation . Washington: USDA, 1960. 265p.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Soil Survey Division. Soil Conservation Service. Soil Survey Staff. **Keys to soil taxonomy**. 6.ed. Washington, 1994. 306p.

FEDOROFF, N.; ESWARAN, H. Micromorfology of Ultisols. In: DOUGLAS, L.A.; THOMPSON, M.L. (Ed.). **Soil micromorfology and soil classification**. Madison: Soil Science Society of America, 1985. cap.8, p.145-164.

FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da Região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.507-514, 1999.

- FILIZOLA, H.F.; LAMOTTE, M.; FRITSCH, E. et al. Os fragipãs e duripãs das depressões dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste brasileiro: uma proposta de evolução. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.947-963, 2001.
- FITZPATRICK, R.W.; SCHWERTMANN, U. Al-substituted goethite – an indicator of pedogenic and other weathering environments in South Africa. **Geoderma**, v.27, p.335-347, 1982.
- FORTUNATO, F.F.; VILAS BOAS, G.S.; RIBEIRO, L.P. et al. Novo modelo para a origem dos duripãs e fragipãs dos Tabuleiros Costeiros no Litoral Norte da Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28., Londrina, 2001. **Resumos**. Londrina: SBCS, 2001. p.221.
- FRANZMEIER, D.P.; CHARTRES, C.J.; WOOD, J.T. Hardsetting soils in southeast Australia: landscape and profile processes. **Soil Science Society of America Journal**, v.60, n.4, p.1178-1187, 1996.
- FRANZMEIER, D.P.; NORTON, L.D.; STEINHARDT, G.C. Fragipan formation in Midwestern United States. In: SMECK, N.E.; CIOLKOSZ, E.J. **Fragipans: their occurrence, classification, and genesis**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p.69-97. (SSSA Special Publication, 24).
- GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: ASA, SSSA, 1986. pt.1: Physical and mineralogical methods. cap. 15, p. 383-409.
- GÉRARD, F.; FRANÇOIS, M.; RANGER, J. Processes controlling silica concentration in leaching and capillary soil solutions of an acidic brown forest soil (Rhône, France). **Geoderma**, v.107, n.3/4, p.197-226, 2002.
- GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A.P. Conceitos sobre solos coesos e *hardsetting*. **Scientia Agricola**, v.59, n.3, p.613-620, 2002.

- GOUDIE, A. **Duricrusts in tropical and subtropical landscapes**. Oxford: Clarendon Press, 1973. 174p.
- GROSSMAN, R.B.; CARLISLE, F.J. Fragipan soils on the eastern United States. **Advances in Agronomy**, v.21, p.237-279, 1969.
- GUERRA, A.T. **Dicionário geológico - geomorfológico**. 5.ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1978. 448p. (Biblioteca Geográfica Brasileira. Série A, 20).
- HSU, P. H. Aluminum oxides and oxyhydroxides. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Ed.). **Minerals in soil environments**. 2.ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. cap.7, p.331-378.
- HUGHES, J.C.; BROWN, G. A crystallinity index for soil kaolins and its relation to parent rock, climate and soil maturity. **Journal of Soil Science**, v.30, n.3, p.557-563, 1979.
- JACKSON, M.L. **Soil analysis: advanced course**. 2.ed. Madison: University of Wisconsin, 1973. 895 p.
- JACOMINE, P. T. K. Fragipans em solos de "Tabuleiros": características, gênese e implicações no uso agrícola. Recife, 1974. 84p. Tese (Livre Docência) – Universidade Federal Rural de Pernambuco.
- JACOMINE, P. T. K. Distribuição geográfica, características e classificação dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS – PESQUISA E DESENVOLVIMENTO PARA OS TABULEIROS COSTEIROS, Cruz das Almas, 1996. **Anais**. Aracaju: Embrapa; EAUFBA; IGUFBA, 1996. p.13-26.
- JAMES, H.R.; RANSOM, M.D.; MILES, R.J. Fragipan genesis in polygenetic soils on the plateau of Missouri. **Soil Science Society of America Journal**, v.59, p.151-160, 1995.

- JAMES, V.; CANEROT, J.; MEYER, A. et al. Growth and destruction of Bathonian silica nodules in the Western Pyrenees (France). **Sedimentary Geology**, v.132, n.1/2, p.5-23, 2000.
- KÄMPF, N; SCHWERTMANN, U. Goethite and hematite in a climosequence in southern Brazil and their application in classification on kaolinitic soils. **Geoderma**, v.29, p.27-39, 1983.
- KARATHANASIS, A.D. Solution chemistry of fragipans – thermodynamic approach to understanding fragipan formation. In: SMECK, N.E.; CIOLKOSZ, E.J. **Fragipans: their occurrence, classification, and genesis**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p.113-139. (SSSA Special Publication, 24)
- LAMOTTE, M.; BRUAND, A.; HUMBEL, F.X. et al. A hard sandy-loam soil from semi-arid Northern Cameroon: I. Fabric of the groundmass. **European Journal of Soil Science**, v.48, n.2, p.213-225, 1997a.
- LAMOTTE, M.; BRUAND, A.; OHNENSTETTER, D. et al. A hard sandy-loam soil from semi-arid Northern Cameroon: II. Geochemistry and mineralogy of the bonding agent. **European Journal of Soil Science**, v.48, n.2, p. 227-237, 1997b.
- LEMOS, R.C.; SANTOS, R.D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 3.ed. Campinas: SBCS, 1996. 84p.
- LIMA, P.C.; CURI, N.; LEPSCH, I.F. Terminologia de micromorfologia do solo. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.10, p.33-43, 1985.
- LINDBO, D. L; VENEMAN, P.L.M. Fragipans in the Northeastern United States. In: SMECK, N.E.; CIOLKOSZ, E.J. **Fragipans: their occurrence, classification, and genesis**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p.11-31. (SSSA Special Publication, 24).

- LINDBO, D. L.; VENEMAN, P.L.M. Micromorphology of selected Massachusetts fragipan soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.57, n.2, p.437-442, 1993.
- LINDSAY, W.L. **Chemical equilibria in soils**. New York: Wiley-Interscience, 1979. 449p.
- MABESOONE, J.M.; CAMPOS E SILVA, A.; BEURLLEN, K. Estratigrafia e origem do Grupo Barreiras em Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geociências**, v.2, p.173-188, 1972.
- MATOSO, S. Q.; ROBERTSON, F. S. Uso geológico do termo ‘barreiras’. **Boletim Técnico da Petrobrás**, v.2, n.3, p.37-43, 1959.
- McBURNETT, S.L.; FRANZMEIER, D.P. Pedogenesis and cementation in calcareous till in Indiana. **Soil Science Society of America Journal**. v.61, p.1098-1104, 1997.
- MELO, F.J.R.; SANTOS, M.C. Micromorfologia e mineralogia de dois solos de tabuleiro costeiro de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, n.1, p.99-108, 1996.
- MELO, V.F.; SINGH, B.; SCHAEFER, C.E.G.R. et al. Chemical and mineralogical properties of kaolinite-rich brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.65, p.1324-1333, 2001.
- MELO, V.F.; NOVAIS, R.F.; SCHAEFER, C.E.G.R. et al. Mineralogias das frações areia, silte e argila de sedimentos do Grupo Barreiras no Município de Aracruz, Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n.1. p.29-41, 2002a.
- MELO, V.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; NOVAIS, R.F. et al. Distribuição de potássio, magnésio e outros metais em minerais de sedimentos do grupo barreiras no Município de Aracruz, Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n.1. p.43-51, 2002b.

- MELO, V.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; NOVAIS, R.F. et al. Potassium and magnesium in clay minerals of some brazilian soils as indicated by a sequential extraction procedure. **Communications in Soil Science And Plant Analysis**, v.33, n.13/14, p.2203-2225, 2002c.
- MELO, V.F.; SCHAEFER, C.E.G.R.; SINGH, B. et al. Propriedades químicas e cristalográficas da Caulinita e dos óxidos de ferro em sedimentos do Grupo Barreiras no Município de Aracruz, Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n.1. p.53-64, 2002d.
- MILNES, A.R.; THIRY, M. Silcretes. In: MARTINI, I.P.; CHESWORTH, W. (Ed.). **Developments in earth surface processes**. 2. Weathering, soils & paleosols. Amsterdam: Elsevier, 1992. cap.14, p.349-377.
- MOREAU, A.M.S.S. Gênese, mineralogia e micromorfologia de horizontes coeso, fragipã e duripã em solos dos Tabuleiros Costeiros do Sul da Bahia. Viçosa, 2001. 138p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa.
- NAHON, D.B. Self-organization in chemical lateritic weathering. **Geoderma**, v.51, p.5-13, 1991.
- NARDY, A.J.R.; ENZWEILER, J.; BAHIA FILHO, O. et al. Determinação de elementos maiores e menores em rochas silicáticas por espectrometria de fluorescência de raios-x: resultados preliminares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 6., Salvador, 1997. **Anais**. Salvador: Sociedade Brasileira de Geoquímica, 1997. p.346-348.
- NASH, D. J.; SHAW, P. A. Silica and carbonate relationships in silcrete-calcrete intergrade duricrusts from the Kalahari of Botswana and Namibia. **Journal of African Earth Sciences**, v.27, n.1, p.11-25, 1998.

- NORFLEET, M.L.; KARATHANASIS, A.D. Some physical and chemical factors contributing to fragipan strength in Kentucky soils. **Geoderma**, v.71, n.3/4, p.289-301, 1996.
- NORRISH, K.; TAYLOR, R.M. The isomorphous replacement of iron by aluminum in soil goethites. **Journal of Soil Science**, v.12, p.294-306, 1961.
- NORTON, L.D. Micromorphology of silica cementation in soils. In: INTERNATIONAL WORKING MEETING ON SOIL MICROMORPHOLOGY, 9., Townsville, 1992. **Soil micromorphology: studies in management and genesis; proceedings**, edited by A.J. Ringrose-Voase and G.S. Humphreys. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.811-824. (Developments in Soil Science, 22)
- OEHLER, J.H. Deposition and diagenesis of biogenic silica. In: TRUDINGER, P.A.; SWAINE, D.J. (Ed.). **Biogeochemical cycling of mineral-forming elements**. Amsterdam: Elsevier, 1979. p.467-479.
- OLIVEIRA, J.B. **Pedologia aplicada**. Jaboticabal: FUNEP, 2001. 414p.
- RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B. et al. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 2.ed. Viçosa: NEPUT, 1995. 336p.
- REZENDE, J. O. **Solos coesos dos Tabuleiros Costeiros: limitações agrícolas e manejo**. Salvador: SEAGRI, SPA, 2000. 117p. (Série Estudos Agrícolas, 1)
- RIBEIRO, L. P. Gênese, evolução e degradação dos solos amarelos coesos dos Tabuleiros Costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS – PESQUISA E DESENVOLVIMENTO PARA OS TABULEIROS COSTEIROS, Cruz das Almas, 1996. **Anais**. Aracaju: Embrapa; EAUFBA; IGUFBA, 1996. p.17-35.
- RIBEIRO, L. P. **Os latossolos amarelos do Recôncavo Baiano: gênese, evolução e degradação**. Salvador: SEPLANTEC, CADCT, 1998. 99p.

- RIBEIRO, L. P. Evolução da cobertura pedológica dos Tabuleiros Costeiros e a gênese dos horizontes coesos. In: CINTRA, L.F.D.; ANJOS, J.L.; IVO, W.M.P.M. (Ed.). **Workshop Coesão em solos dos Tabuleiros Costeiros**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. p.93-121.
- RIBEIRO, L. P.; SANTOS, D. M. B.; LIMA NETO, I.A. et al. Levantamento detalhado dos solos, capacidade de uso e classificação de terras para irrigação da Estação de Plasticultura da Universidade Federal da Bahia / Politeo em Cruz das Almas (BA). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, p.105 – 113, 1995.
- RHOTON, F.E.; RÖMKENS, M.J.M. Water distribution in a fragipan soil during the growing season. **Agronomy Journal**, v.90, n.3, p.368-375, 1998.
- SCHWERTMANN, U.; KÄMPF, N. Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of Southern and Central Brazil. **Soil Science**, v.139, n.4, p.344-350, 1985.
- SCHWERTMANN, U.; FITZPATRICK, R.W.; LE ROUX, J. Al substitution and differential disorder in soil hematites. **Clay and Clays Minerals**, v.25, p.373-374, 1977.
- SCHWERTMANN, U.; FITZPATRICK, R.W.; TAYLOR, R.M. et al. The influence of aluminum on iron oxides. Part II. Preparation and properties of Al substituted on hematites. **Clay and Clays Minerals**, v.25, p.373-374, 1979.
- SILVA, A. J. N.; RIBEIRO, M. R. Caracterização de Latossolo Amarelo sob cultivo contínuo da cana-de-açúcar no Estado de Alagoas: atributos morfológicos e físicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 677 – 684, 1997.
- SILVA, F.B.R.; LEPRUN, J.C.; BOULET, R. Duripãs em solos dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste do Brasil: mineralogia, micromorfologia e gênese (compact disc). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., Rio de Janeiro, 1997. **Resumos expandidos**. Rio de Janeiro: SBCS, 1997.

- SILVA, F.B.R.; RICHÉ, G.R.; TONNEAU, J.P. et al. **Zoneamento Agroecológico do Nordeste: diagnóstico do quadro natural e agrossocioeconômico**. Petrolina: EMBRAPA, CPATSA, 1993. 2v.
- SINGER, M.J.; SOUTHARD, R.J.; WARRINGTON D.N. et al. Stability of synthetic sand-clay aggregates after wetting and drying cycles. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, n.6, p.1843-1848, 1992.
- SINGH, B.; GILKES, R.J. Properties of soil kaolinites from south-western Australia. **Journal of Soil Science**, v.43, p.645-667, 1992.
- SMECK, N.E.; THOMPSON, M.L.; NORTON, L.D. et al. Weathering discontinuities: a key to fragipan formation. In: SMECK, N.E.; CIOLKOSZ, E.J. **Fragipans: their occurrence, classification, and genesis**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p.99-112. (SSSA Special Publication, 24).
- SOUZA, L. S. Uso e manejo dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS – PESQUISA E DESENVOLVIMENTO PARA OS TABULEIROS COSTEIROS, Cruz das Almas, 1996. **Anais**. Aracaju: Embrapa; EAUFBA; IGUFBA, 1996. p.36-75.
- SOUZA, L.S.; PAIVA, A.Q.; SOUZA, L.D. et al. Água no solo influenciada pela posição na paisagem, em uma topossequência de solos de tabuleiro do estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n.4, p.843-855, 2002.
- STOOPS, G.; JONGERIUS, A. Proposal for a micromorphological classification of soils material. I. A classification of related distribution of coarse and fine particles. **Geoderma**, v.13, p.189-200, 1975.
- SUGUIO, K.; NOGUEIRA, A.C.R. Revisão crítica dos conhecimentos geológicos sobre a Formação (ou Grupo?) Barreiras do Neógeno e o seu possível significado como

- testemunho de alguns eventos geológicos mundiais. **Geociências**, v.18, n.2, p.461-479, 1999.
- SUGUIO, K.; BIDEGAIN, J.C.; MÖRNER, N.A. Dados preliminares sobre as idades paleomagnéticas do Grupo Barreiras e da Formação São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v.16, n.2, p.171-175, 1986.
- SULLIVAN, L.A.; KOPPI, A. J. Micromorphology of authigenic celestobarite in a duripan from central Australia. **Geoderma**, v.64, n.3/4, p.357-361, 1995.
- SUMMERFIELD, M.A. Silcrete. In: GOUDIE, A.S.; PYE, K. (Ed.). **Chemical sediments and geomorphology: precipitates and residua in the near-surface environment**. London: Academic Press, 1983. p.55-91.
- TARDY, Y. Diversity and terminology of lateritic profiles. In: MARTINI, I.P.; CHESWORTH, W. (Ed.). **Developments in earth surface processes**. 2. Weathering, soils & paleosols. Amsterdam: Elsevier, 1992. cap.15, p.379-405.
- TARDY, Y.; NAHON, D. geochemistry of laterites, stability of Al-goethite, Al-hematite, and Fe<sup>3+</sup>-kaolinite in bauxites and ferricretes: an approach to the mechanism of concretion formation. **American Journal of Science**, v.285, p.865-903, 1985.
- THIRY, M; MILLOT, G. Mineralogical forms of silica and their sequence of formation in silcretes. **Journal Sedimentary Petrology**, v. 57, p.343-352, 1987.
- UCHA, J.M. Processos de transformação LATOSSOLO – ESPODOSSOLO sobre os sedimentos do Grupo Barreiras nos Tabuleiros Costeiros do litoral norte do Estado da Bahia. Salvador, 2000. 167p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Bahia.
- UCHA, J.M.; BOTELHO, M; VILAS BOAS, G.S. et al. Uso de Radar Penetrante no solo (GPR) na investigação dos solos dos Tabuleiros Costeiros no Litoral Norte do Estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.373–390, 2002.

- UEHARA, G.; JONES, R.C. Bonding mechanisms for soil crusts: Particle surface and cementing agents. In: CARY, J.W.; EVANS, D.D. (Ed) **Soil crusts**. Tucson: University of Arizona, 1972. p.17-28. (Agricultural Experiment Station. Technical Bulletin, 214).
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. **Caracterização de solos e avaliação dos principais sistemas de manejo dos Tabuleiros Costeiros do Baixo Rio Doce e das Regiões Norte do Estado do Espírito Santo e sua interpretação para uso agrícola**. Viçosa, 1984. 153p.
- VAN BREEMEN, N.; BUURMAN, P. **Soil formation**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1998. 377p.
- VILAS BOAS, G. S. **Geologia da Bahia**: texto explicativo. Salvador: Secretaria da Indústria, Comércio e Mineração, Superintendência de Geologia e Recursos Minerais, 1996. cap.8, p.165-167: Sedimentos terciários.
- WATSON, A. Desert soils. In: MARTINI, I.P.; CHESWORTH, W. (Ed.). **Developments in earth surface processes**. 2. Weathering, soils & paleosols. Amsterdam: Elsevier, 1992. cap.10, p.225-260.
- WELTON, J.E. **SEM petrology atlas**. Methods in exploration series. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1984. 237p.
- WILSON, M.A.; BURT, R.; SOBECKI, T.M.; ENGEL, R.J.; HIPPLE, K. Soil properties and genesis of pans in till-derived andisols, Olympic Peninsula, Washington. **Soil Science Society of America Journal**, v.60, n.1, p.206-218, 1996.

## **APÊNDICES**

## **1 Descrição morfológica dos perfis**

**Perfil P0: Argissolo Acinzentado Distrófico duripânico – PACd**

- Ap 0-27 cm; cinzento-escuro (2,5Y 4/1, úmido) e cinzento (2,5Y 5/1, seco); arenosa; fraca média a grande granular; ligeiramente dura, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição plana e clara.
- B/A 27-45 cm; cinzento-brunado-claro (10YR 6/2), mosqueado comum, médio e proeminente bruno-forte (7,5YR 5/8, úmido) e amarelo-brunado (10YR 6/8, úmido); transição plana e abrupta.
- Btm1 45-60 cm; bruno-amarelado-claro (2,5Y 6/3), mosqueado abundante, grande e proeminente vermelho-amarelado (5YR 4/6) e amarelo-brunado (10YR 6/8); transição plana e gradual.
- Btm2 60-200 cm+; cinzento-claro (2,5Y 7/2), mosqueado pouco, pequeno e proeminente bruno-amarelado (10YR 5/8).

**Observações:**

Raízes: comuns finas e médias no Ap.

B/A: constituído predominantemente por grandes blocos (>10 cm) de duripã.

Btm1: duripãs contínuos com raras fendas e rachaduras. Consegue-se coletar, com auxílio de martelo pedológico, blocos de duripã muito grandes (> 15 cm).

Btm2: duripãs contínuos com raras fendas e rachaduras. Os blocos de duripã comumente se quebram em tamanhos menores (~ 8 cm) e, embora ainda classificado como extremamente cimentado, o grau de cimentação é ligeiramente inferior ao do Btm1, apresentando menor resistência para ser quebrado.

“Língua”: fenda na camada contínua do duripã, constituída de material não cimentado, embora sejam encontrados estruturas com diferentes graus de cimentação. Até 90 cm o material é semelhante ao do horizonte Ap.

90-130 cm: bruno-acinzentado (2,5Y 5/2); arenosa; fraca pequena blocos subangulares; ligeiramente dura a dura, muito friável, não plástica e não pegajosa. Pouco fragipã e freqüente duripã com tamanho de até 3 cm.

**Perfil P1: Argissolo Amarelo Distrófico duripânico - PAd1**

- Ap 0-15 cm; preto (2,5Y 2,5/1, úmido) e cinzento muito escuro (2,5Y 3/1, seco); arenosa; granular que se desfaz em grãos simples; macia, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição ondulada e abrupta.
- AB 15-27 cm; bruno-oliváceo-claro (2,5Y 5/3); arenosa; fraca média blocos subangulares; muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição ondulada e abrupta.
- BA 27-48 cm; bruno-oliváceo-claro (2,5Y 5/3), mosqueado abundante, grande e proeminente vermelho-amarelado (5YR 4/6) e bruno-amarelado (10YR 5/6); franca; fraca média blocos subangulares; muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição ondulada e abrupta.
- Btmc 48-59 cm; coloração variegada composta de vermelho-escuro-acinzentado (10R 3/4), vermelho (2,5YR 4/8), bruno-amarelado (10YR 5/8) e bruno-amarelado-claro (2,5Y 6/4); transição ondulada e abrupta.
- Btm 59-90 cm; coloração variegada composta de vermelho-escuro-acinzentado (10R 3/4), bruno-forte (7,5YR 5/8), bruno-amarelado (10YR 5/8) e amarelo-oliváceo (2,5Y 6/6); transição plana e gradual.
- Btmx 90-160 cm; bruno-amarelado-claro (2,5Y 6/4), mosqueado abundante, grande e proeminente vermelho-escuro (10R 3/6) e bruno-forte (7,5YR 5/8); franca; maciça; muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.
- Btx 160-230 cm; amarelo-claro-acinzentado (2,5Y 7/4), mosqueado abundante, grande e proeminente vermelho (10R 4/6) e vermelho-amarelado (5YR 4/6); franca; maciça; muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.

Bt 230-360 cm+; coloração variegada composta de vermelho (10R 4/6), bruno-amarelado (10YR 5/6) e cinzento-claro (2,5Y 7/2); argilosa; maciça; ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.

**Observações:**

Raízes: comuns finas e médias no Ap, raras grandes e comuns finas e médias no AB, raras médias no BA, raras médias no Btmc, poucas finas e médias no Btm, poucas finas e médias no Btmx, poucas finas e raras médias no Btx e Bt.

Btmc é uma camada contínua de duripã na qual se encontra uma banda ferruginosa em toda a superfície. No limite inferior desse horizonte também há uma banda ferruginosa, porém, não é contínua e apresenta-se mais delgada.

Uma grossa raiz ( $\phi \sim 8\text{cm}$ ) em decomposição é encontrada, no sentido horizontal, logo abaixo dos 10 cm de profundidade, o que é indicativo que havia uma camada de impedimento mais superficial.

**Perfil P2: Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico - PAd2**

- Ap 0-18 cm; bruno-acinzentado (2,5Y 5/2, úmido) e cinzento-brunado-claro (2,5Y 6/2, seco); arenosa; moderada a forte, média a grande granular que se desfaz em grãos simples; ligeiramente dura, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição plana e clara.
- AB 18-46 cm; bruno-amarelado-claro (2,5Y 6/4); argilosa; moderada a forte, média a grande blocos subangulares; ligeiramente dura a dura, muito friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
- BA 46-66 cm; bruno-amarelado-claro (2,5Y 6/4), mosqueado abundante, grande e proeminente bruno-forte (7,5YR 4/6), amarelo-brunado (10YR 6/8) e cinzento-claro (2,5Y 7/1); argilosa; moderada a forte pequena blocos subangulares; dura, friável, plástica e pegajosa; transição plana e gradual.
- Btmx 66-118 cm; coloração variegada composta de vermelho-escuro-acinzentado (10R 3/4), vermelho (2,5YR 4/8), bruno-amarelado (10YR 5/8) e cinzento-claro (2,5Y 7/2); franco argilosa; forte média a grande blocos subangulares; extremamente dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e difusa.
- Btx 118-162 cm; amarelo-claro-acinzentado (2,5Y 7/4), mosqueado comum, grande e proeminente vermelho-escuro (10R 3/6), amarelo-avermelhado (7,5YR 6/8) e cinzento-claro (2,5Y 7/1); argilosa; moderada a forte pequena blocos subangulares; dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e difusa.
- Bt 118-196 cm+; amarelo-claro-acinzentado (2,5Y 7/3), mosqueado abundante, grande e proeminente vermelho-escuro (10R 3/6), vermelho-amarelado (5YR 5/8), bruno-amarelado-claro (2,5Y 6/4) e cinzento-claro (2,5Y 7/1); argilosa; moderada a forte, pequena a média, blocos subangulares; ligeiramente dura,

muito friável, ligeiramente plástica e pegajosa.

**Observações:**

Raízes: muitas finas, comuns médias e raras grossas no Ap, poucas finas e médias e raras grandes no BA, poucas finas e raras médias no Btx, raras finas e médias no Btmx e Btx' e raras finas no Bt.

A base do AB possui bolsões (5 a 20 cm de largura e 13 cm de altura) preenchidos com material mais solto.

Os mosqueados vermelhos do BA apresentam as bordas alaranjadas.

Btmx e Btx apresentam línguas esbranquiçadas com manchas mais avermelhadas.

**Perfil P3: Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico plíntico - PAd3**

- Ap 0-17 cm; cinzento muito escuro (2,5Y 3/1, úmido) e cinzento-brunado-claro (2,5Y 6/2, seco); franca argilosa; moderada pequena a média granular e blocos subangulares; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição ondulada e clara.
- AB 17-29 cm; bruno-oliváceo-claro (2,5Y 5/4); franca argilosa; moderada pequena a média blocos subangulares; dura, muito friável, ligeiramente plástica e pegajosa; transição plana e clara.
- BA 29-41 cm; bruno-amarelado-claro (2,5Y 6/4), mosqueado pouco, médio e proeminente vermelho-escuro-acinzentado (10R 3/4) e vermelho (2,5YR 4/6); argilosa; moderada pequena a média blocos subangulares; dura, friável, plástica e pegajosa; transição plana e clara.
- Btf 41-60 cm; bruno-amarelado-claro (2,5Y 6/4), mosqueado abundante, grande e proeminente vermelho-escuro-acinzentado (10R 3/4) e vermelho (2,5YR 4/8); argilosa; moderada pequena a média blocos subangulares; dura, friável, plástica a muito plástica e pegajosa; transição plana e clara.
- Bt 60-126 cm; amarelo-brunado (10YR 6/6), mosqueado comum, grande e proeminente bruno-forte (7,5YR 5/6); argilosa; moderada pequena a média blocos subangulares; dura, muito friável, plástica e pegajosa; transição plana e clara.
- Btx1 126-150 cm; bruno-amarelado (10YR 5/6), mosqueado abundante, grande e proeminente vermelho-escuro-acinzentado (10R 3/6), vermelho-amarelado (5YR 5/6) e amarelo-oliváceo (2,5Y 6/6); franca argilosa; moderada média blocos subangulares; muito dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.

Btx2 150-215 cm+; amarelo-oliváceo (2,5Y 6/6), mosqueado abundante, grande e proeminente vermelho-escuro-acinzentado (10R 3/4), bruno-forte (7,5YR 5/8) e amarelo-brunado (10YR 6/6); argilosa; moderada a forte média blocos subangulares; muito a extremamente dura, friável, ligeiramente plástica e pegajosa.

**Observações:**

Raízes: muitas finas e poucas médias no Ap e AB, poucas finas e médias no BA, poucas finas e raras médias no Btf, raras finas no Bt, Btx1 e Btx2.

Fragmentos de uma banda ferruginosa são encontrados abaixo dos 50 cm (Btf) de forma quase contínua. Alguns fragmentos de nódulos ferruginosos também estão distribuídos no BA e em todo o horizonte Btf.

O material do Bt penetra como língua no horizonte Btx1 e atinge o Btx2 (onde são encontradas as raízes).

Bt possui um raiz grossa (3 cm) desenvolvida no sentido horizontal, indicativo de camada de impedimento.

**Perfil P4: Argissolo Amarelo Distrófico plíntico - PAd4**

- Ap 0-15 cm; bruno-acinzentado-escuro (2,5Y 4/2, úmido) e bruno-oliváceo (2,5Y 4/3, seco); franca; moderada pequena e média granular; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e abrupta.
- BA 15-34 cm; amarelo-oliváceo (2,5Y 6/6); muito argilosa; moderada a fraca pequena blocos subangulares; dura, muito friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.
- Bt1 34-67 cm; amarelo-oliváceo (2,5Y 6/6), mosqueado abundante, grande e proeminente vermelho (2,5YR 5/8); argilosa; moderada a forte, pequena e média, blocos subangulares; dura a muito dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e difusa.
- Bt2 67-108 cm; coloração variegada composta de vermelho (2,5YR 4/8), amarelo-oliváceo (2,5Y 6/6) e branco (5Y 8/1); argilosa; moderada a fraca, pequena e média, blocos subangulares; muito dura, muito friável a friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.
- Btf1 108-145 cm; coloração variegada composta de vermelho-escuro (10R 3/6), vermelho (2,5YR 5/8), amarelo-oliváceo (2,5Y 6/6) e branco (5Y 8/1); argilosa; moderada a forte média blocos subangulares; extremamente dura, muito friável a friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e difusa.
- Btf2 145-190 cm+; coloração variegada composta de vermelho-escuro (10R 3/6), vermelho-amarelado (5YR 5/8), amarelo (2,5Y 7/8) e cinzento-claro (5Y 7/2); muito argilosa; moderada a forte, média blocos subangulares; extremamente dura, muito friável a friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.

**Observações:**

Raízes: comuns finas e poucas médias no Ap, poucas finas e raras médias no BA, raras finas nos demais horizontes.

**Perfil P5: Argissolo Amarelo Distrófico plíntico - PAd5**

- Ap 0-28 cm; bruno (10YR 5/3, úmido) e bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, seco); franca arenosa; fraca pequena e média granular; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e clara.
- BA 28-49 cm; bruno-amarelado (10YR 5/6), mosqueado comum, grande e proeminente vermelho-amarelado (5YR 5/8); argilosa; moderada pequena e média blocos subangulares; dura, muito friável, plástica e ligeiramente pegajosa a pegajosa; transição plana e gradual.
- Bt1 49-79 cm; amarelo-brunado (10YR 6/6), mosqueado comum, médio a grande e proeminente vermelho-amarelado (5YR 4/6) e bruno-forte (7,5YR 5/6); muito argilosa; moderada pequena e média blocos subangulares; ligeiramente dura, muito friável, plástica e ligeiramente pegajosa a pegajosa; transição plana e gradual.
- Bt2 79-117 cm; amarelo-oliváceo (2,5Y 6/6), mosqueado abundante, grande e proeminente vermelho (2,5YR 4/6) e vermelho-amarelado (5YR 4/6); muito argilosa; fraca a moderada, muito pequena a pequena blocos subangulares; ligeiramente dura, muito friável, plástica e ligeiramente pegajosa a pegajosa; transição plana e difusa.
- Btf 117-182 cm; coloração variegada composta de vermelho-escuro-acinzentado (10R 3/4), vermelho (2,5YR 5/8) e amarelo-oliváceo (2,5Y 6/6); muito argilosa; moderada pequena e média blocos subangulares; ligeiramente dura, muito friável, plástica e ligeiramente pegajosa a pegajosa; transição plana e clara.
- Btc 182-210 cm+; coloração variegada composta de vermelho-escuro (10R 3/6), vermelho-amarelado (5YR 5/6) e bruno-forte (7,5Y 5/6); muito argilosa; fraca a moderada pequena blocos subangulares; ligeiramente dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa a pegajosa.

**Observações:**

Raízes: comuns finas e médias no Ap, poucas finas e raras no BA, raras finas e médias no Bt1, raras finas nos demais horizontes.

Btc com grande quantidade de petroplintitas que atingem tamanho de cascalhos (2 a 20 mm) e calhaus (>20 mm), que correspondem respectivamente a 18,0% e 59,1% da massa do solo.

**Perfil P6: Plintossolo Pétrico Concrecionário Distrófico típico - FFcd**

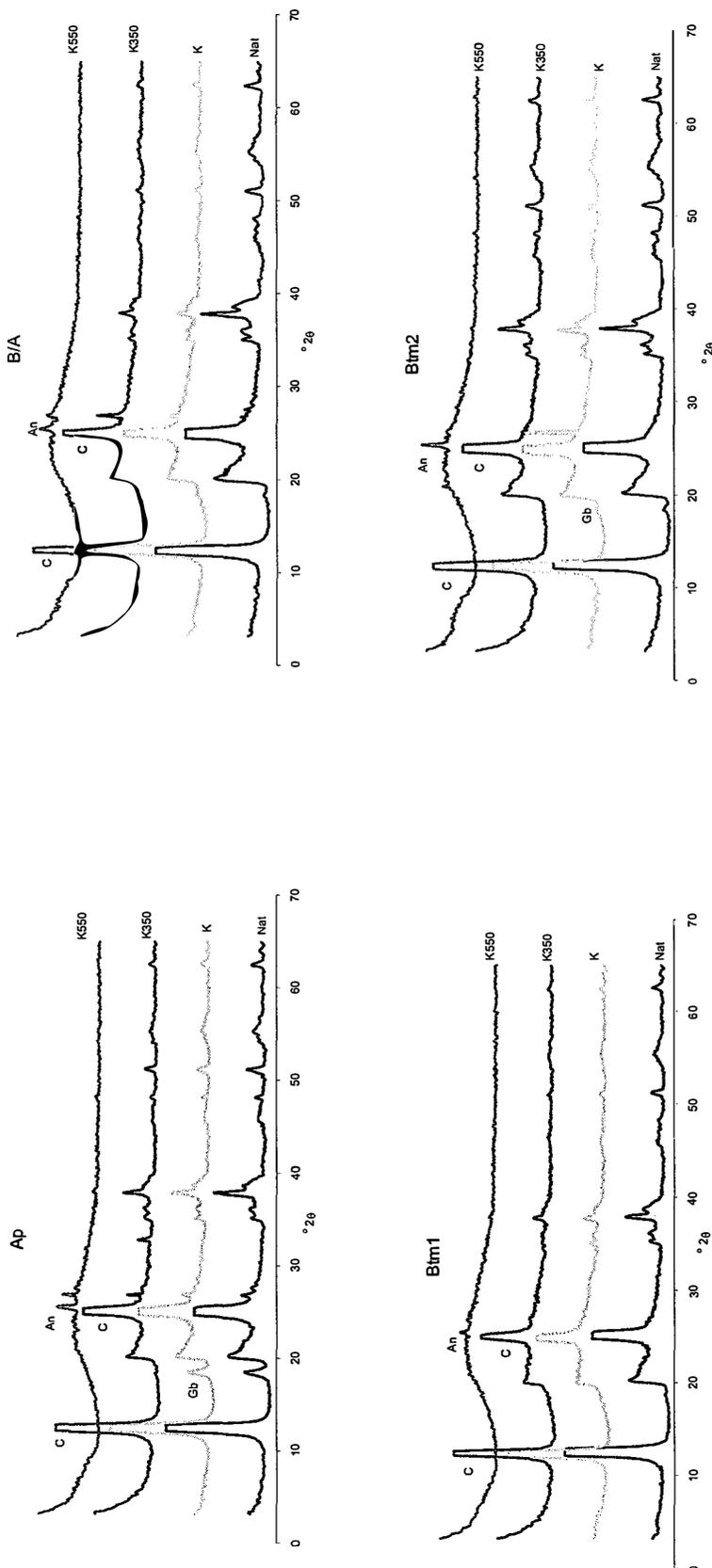
- Apc 0-23 cm; bruno-cinzentado muito escuro (2,5Y 3/2, úmido) e bruno-acinzentado (2,5Y 5/2, seco); franco arenosa; fraco pequena e média granular; ligeiramente dura, muito friável, não plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.
- BAc 23-44 cm; bruno-amarelado (10YR 5/6); argilosa; moderado pequena e média blocos subangulares; dura, muito friável, plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e gradual.
- Btcf1 44-145 cm; coloração variegada composta de vermelho-escuro-acinzentado (10R 3/4), vermelho-amarelado (5YR 5/8), amarelo-brunado (10YR 6/8) e cinzento-claro (2,5Y 7/1); argilosa; fraco pequena blocos subangulares; dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição plana e difusa.
- Btcf2 145-220 cm+; coloração variegada composta de vermelho-escuro-acinzentado (10R 3/4), vermelho (10R 4/8), bruno-forte (7,5YR 5/8) e amarelo-claro-acinzentado (2,5Y 7/3); argilosa; fraco pequena blocos subangulares; dura, muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.

**Observações:**

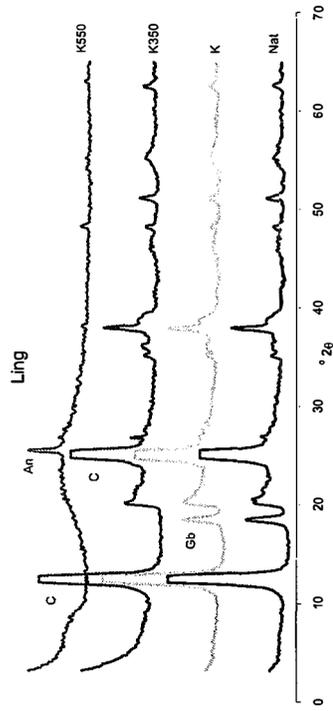
Raízes: comuns finas no Apc, poucas finas no BAc, raras finas no Btcf1 e Btcf2.

As petroplintitas, que ocorrem em grande intensidade inclusive com tamanhos de cascalhos e calhaus, representam as seguintes proporções na massa do solo:  
entre 2 e 20 mm: 35,2% - Ap, 27,5% - Bac, 19,1% - Btcf1 e 28,9% - Btcf2;  
maior que 20 mm: 40,2% - Ap, 30,2% - Bac, 46,7% - Btcf1 e 8,7% - Btcf2;

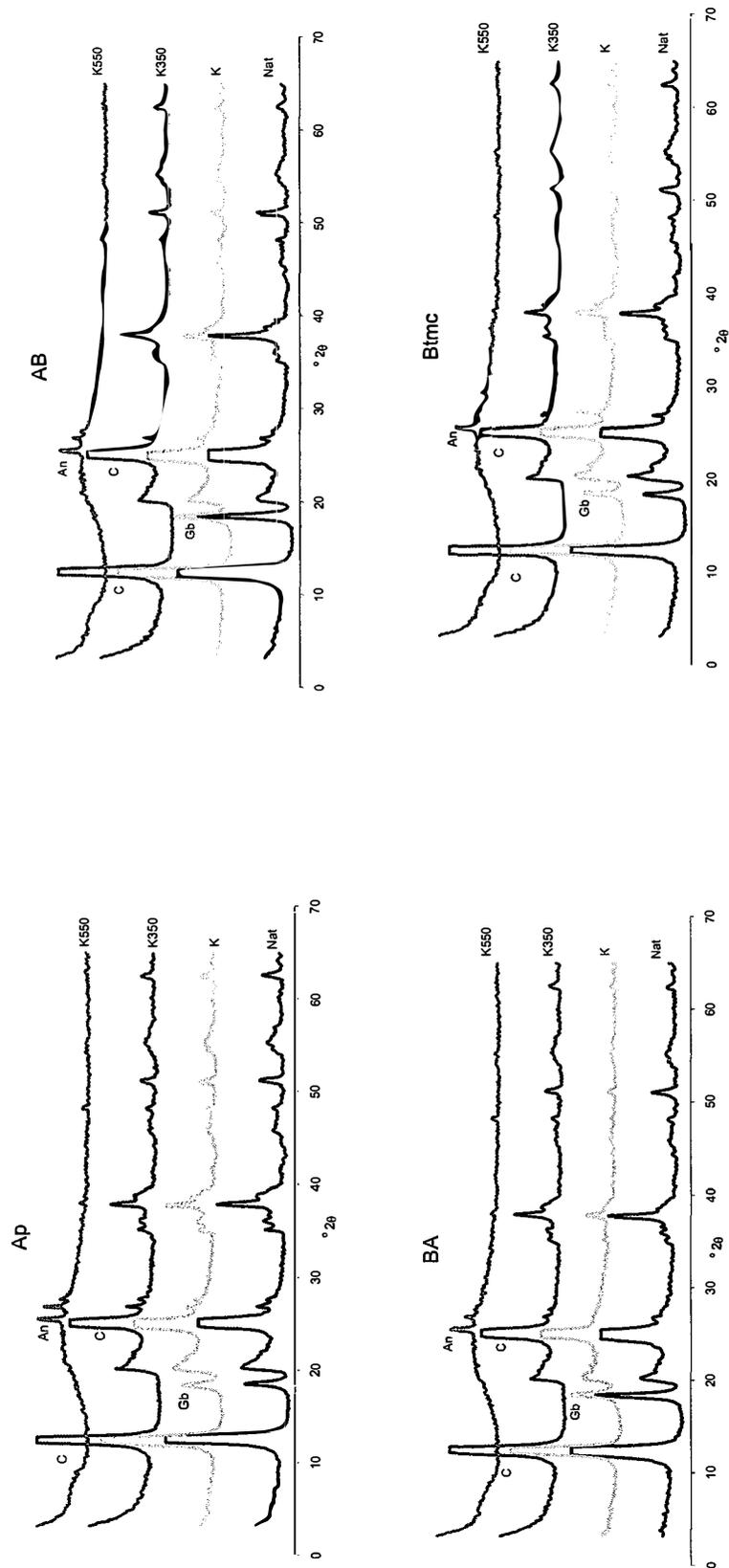
## **2 Difractogramas de raios-x da fração argila submetida a diferentes tratamentos**



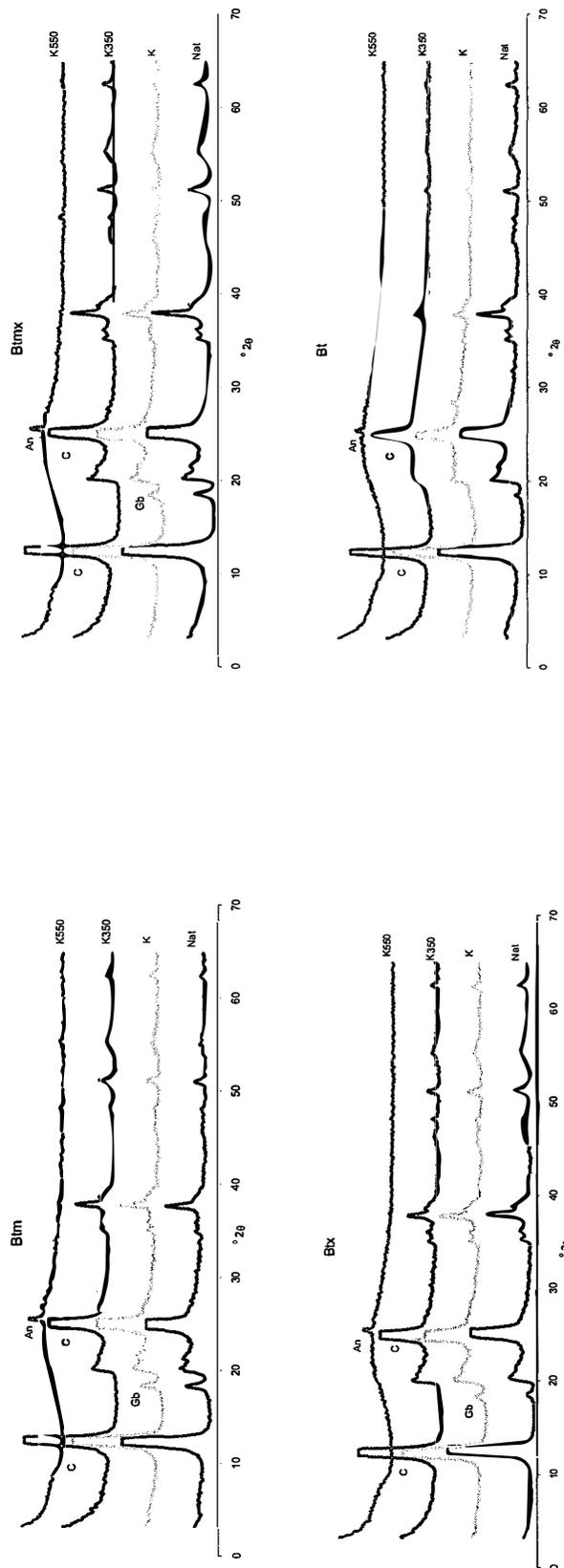
Difratogramas de raios-x da fração argila em condição natural (Nat), saturada com potássio em temperatura ambiente de 22° C (K) e com aquecimento a 350° C (K350) e 550° C (K550) dos diferentes horizontes do perfil PACd. C – caulinita, An – anatásio e Gb – Gibbsita.



Difratogramas de raios-x da fração argila em condição natural (Nat), saturada com potássio em temperatura ambiente de 22° C (K) e com aquecimento a 350° C (K350) e 550° C (K550) da língua do perfil PACd. C – caulinita, An – anatásio e Gb – Gibbsita.



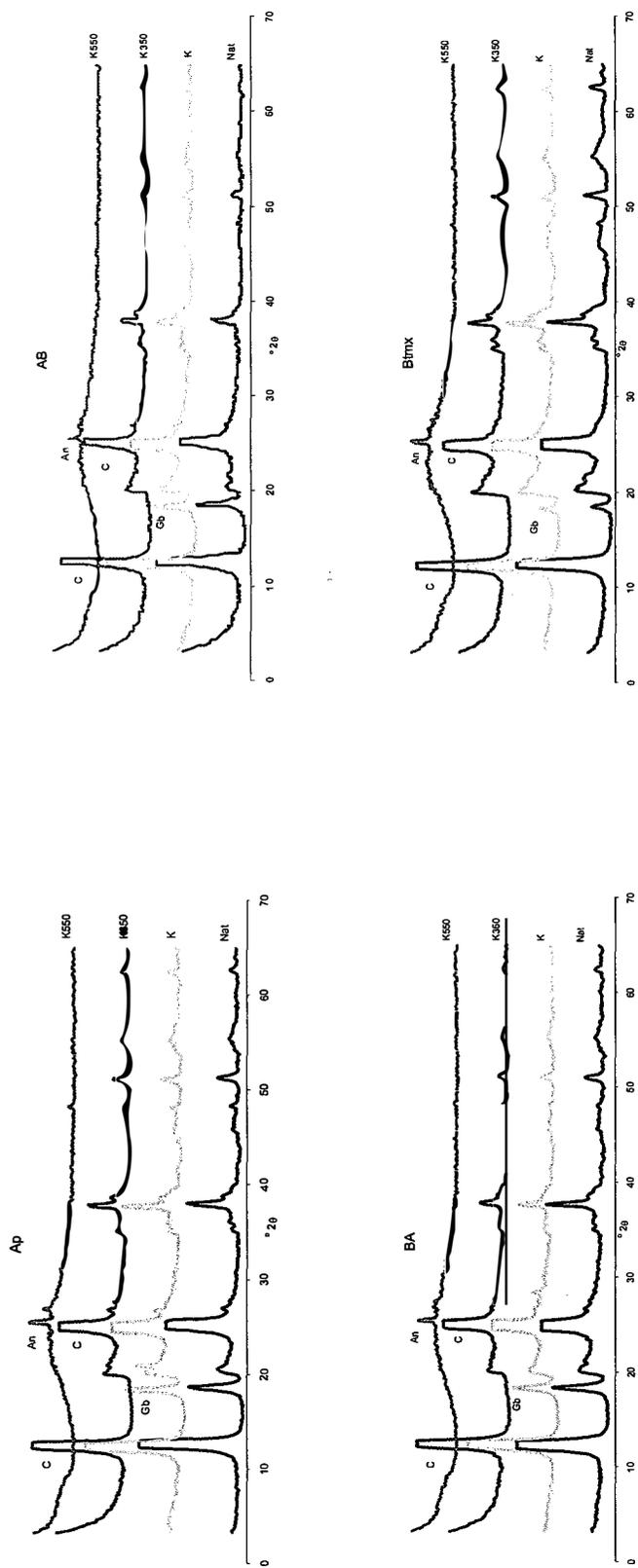
Difratogramas de raios-x da fração argila em condição natural (Nat), saturada com potássio em temperatura ambiente de 22° C (K) e com aquecimento a 350° C (K350) e 550° C (K550) dos horizontes Ap, AB, BA, Btmc e Btm do perfil PAd1. C – caulinita, An – anatásio e Gb – Gibbsita.



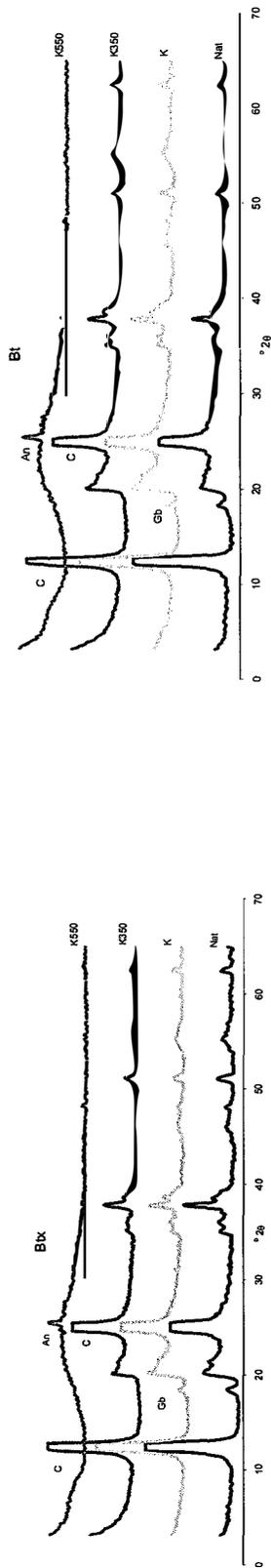
Difratogramas de raios-x da fração argila em condição natural (Nat), saturada com potássio em temperatura ambiente de 22°

C (K) e com aquecimento a 350° C (K350) e 550° C (K550) dos horizontes Btm, Btmx, Btx e Bt do perfil PAd1. C – caulinita, An

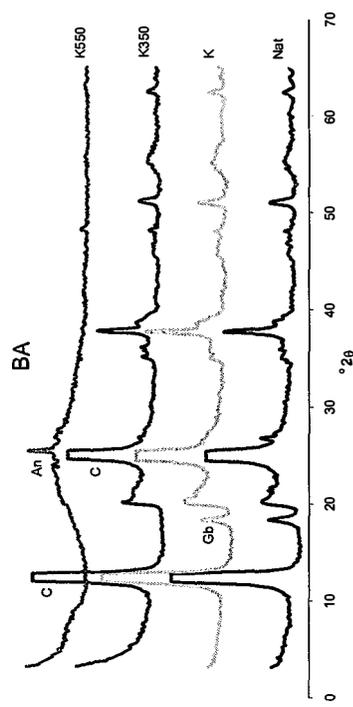
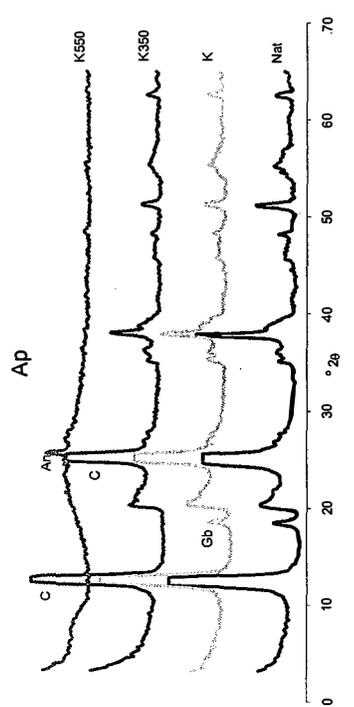
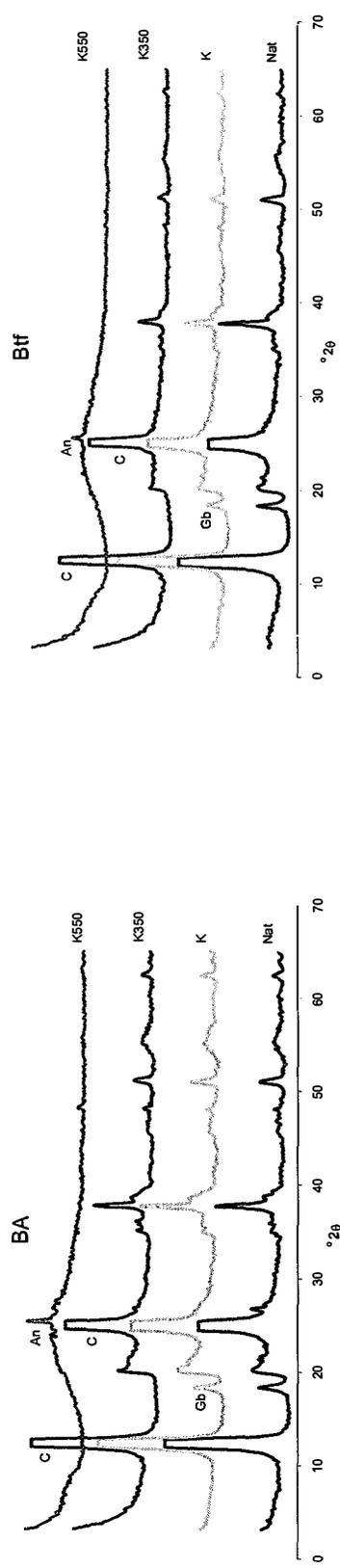
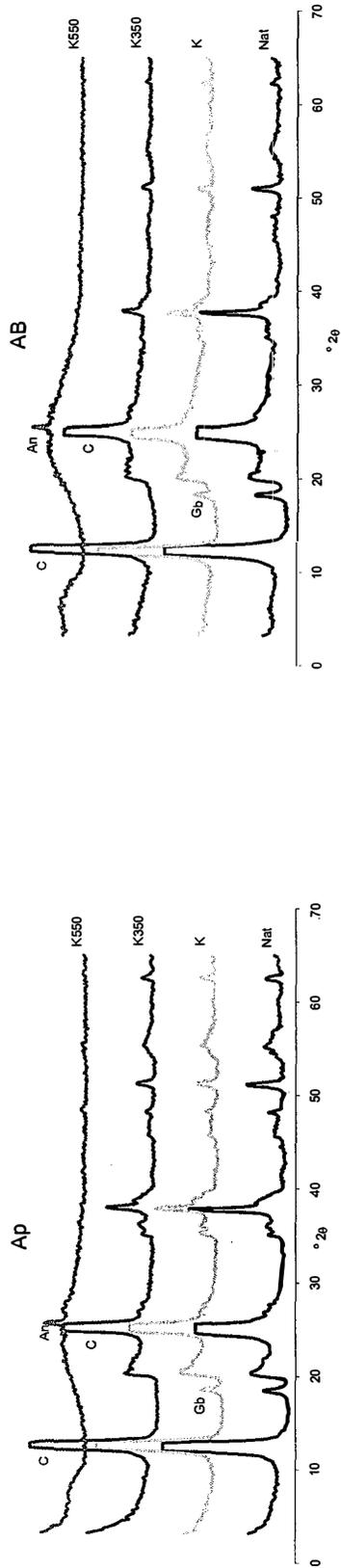
– anatásio e Gb – Gibbsita.



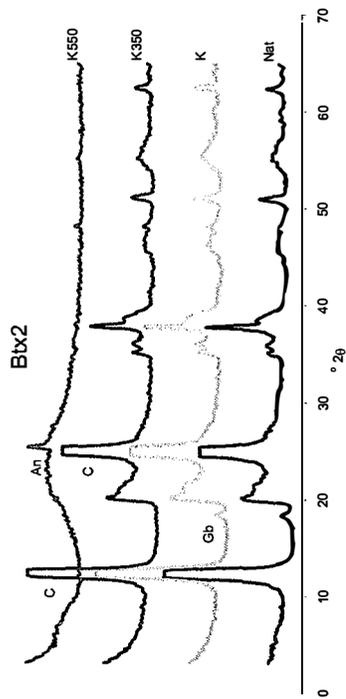
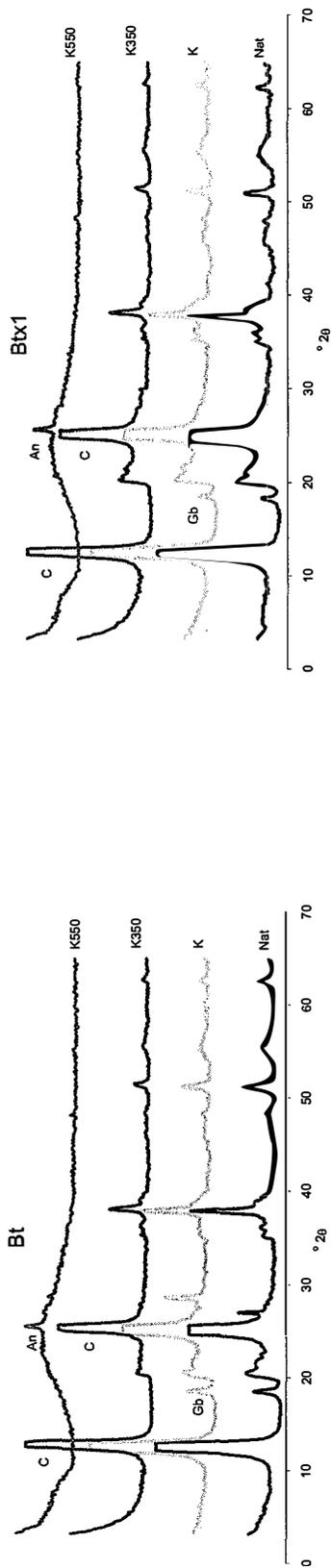
Difratogramas de raios-x da fração argila em condição natural (Nat), saturada com potássio em temperatura ambiente de 22° C (K) e com aquecimento a 350° C (K350) e 550° C (K550) dos horizontes Ap, AB, BA, Btmx do perfil PAd2. C – caulinita, An – anatásio e Gb – Gibbsita.



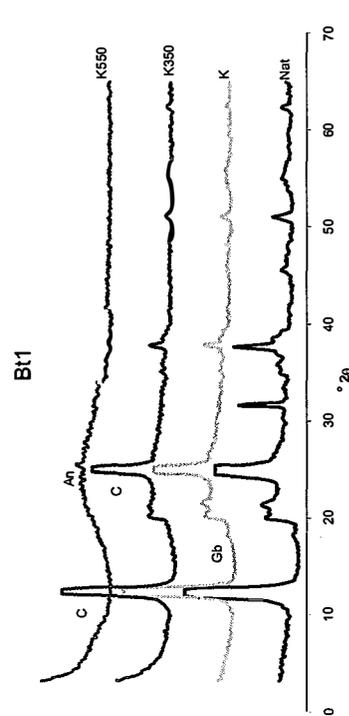
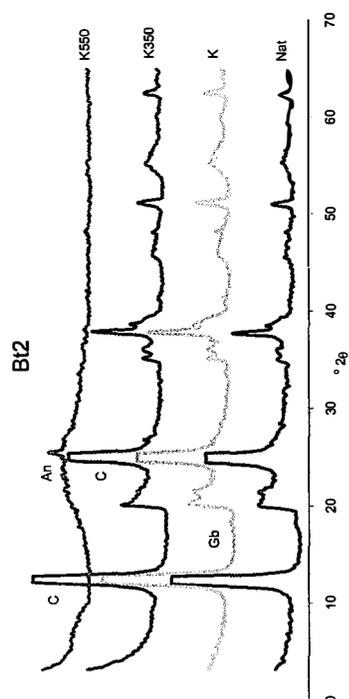
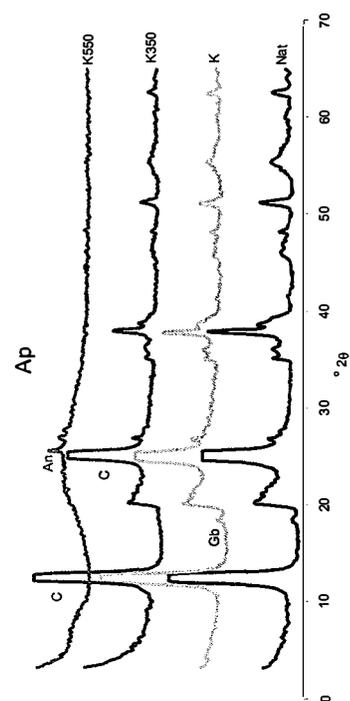
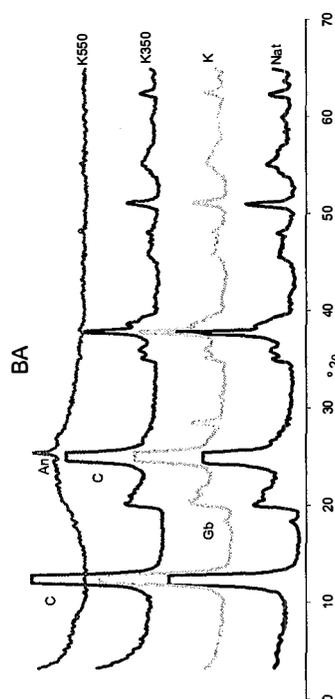
Difratogramas de raios-x da fração argila em condição natural (Nat), saturada com potássio em temperatura ambiente de 22° C (K) e com aquecimento a 350° C (K350) e 550° C (K550) dos horizontes Btx e Bt do perfil PAd2. C – caulinita, An – anatásio e Gb – Gibbsita.



Difratogramas de raios-x da fração argila em condição natural (Nat), saturada com potássio em temperatura ambiente de 22° C (K) e com aquecimento a 350° C (K350) e 550° C (K550) dos horizontes Ap, BA, BA e Btf do perfil PAd3. C – caulinita, An – anatásio e Gb – Gibbsita.



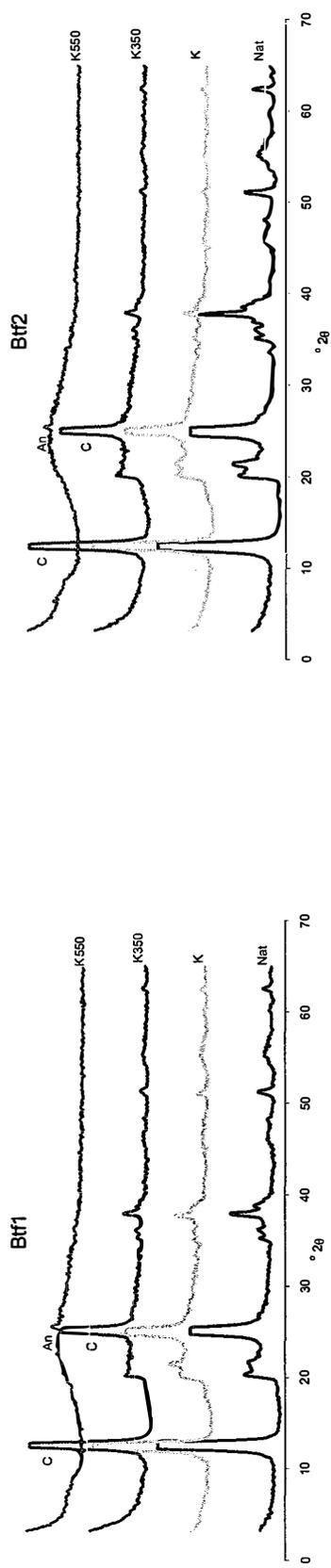
Difratogramas de raios-x da fração argila em condição natural (Nat), saturada com potássio em temperatura ambiente de 22° C (K) e com aquecimento a 350° C (K350) e 550° C (K550) dos horizontes Bt, Btx1 e Btx2 do perfil PAd3. C – caulinita, An – anatásio e Gb – Gibbsita.



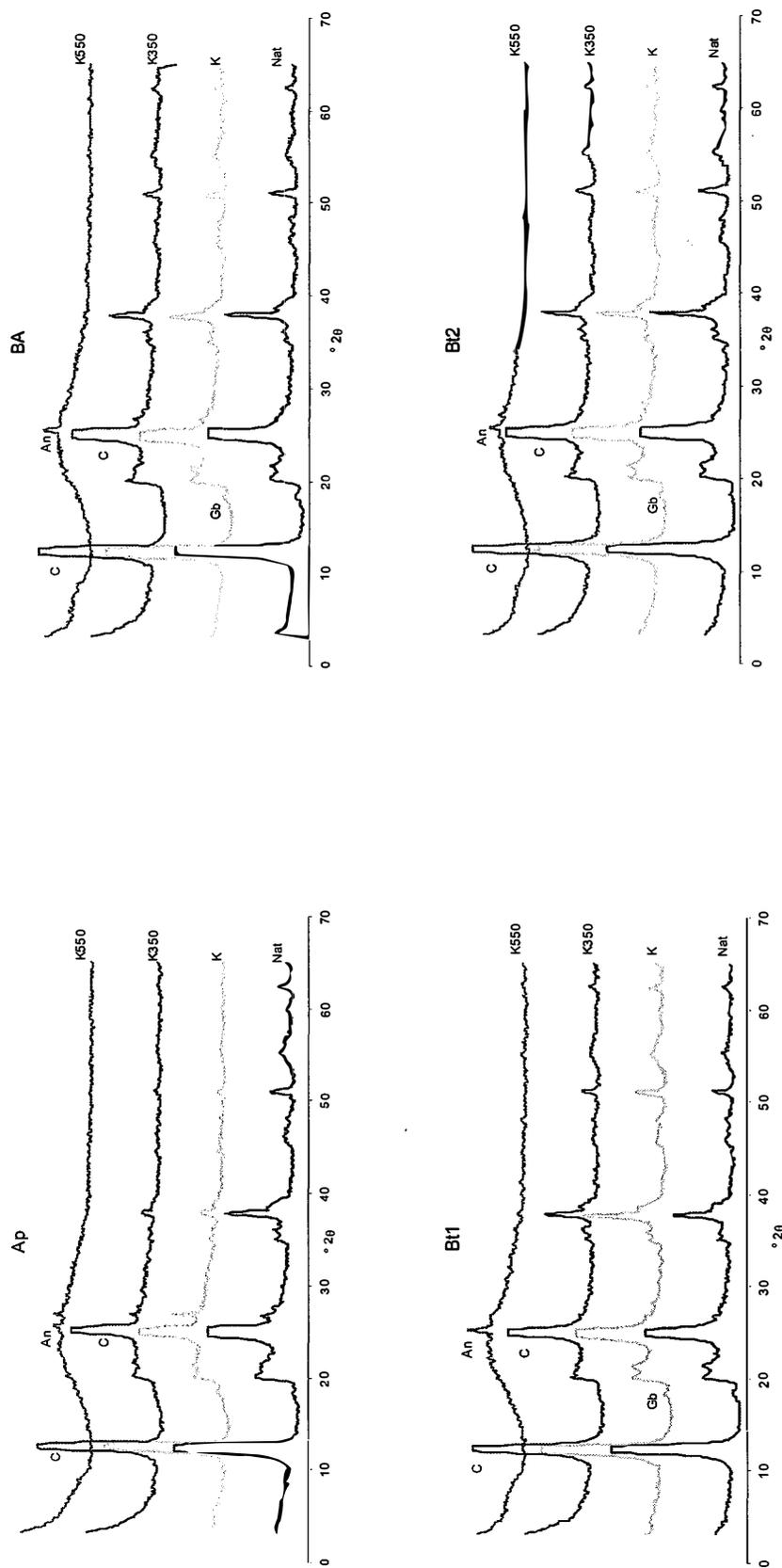
Difratogramas de raios-x da fração argila em condição natural (Nat), saturada com potássio em temperatura ambiente de 22°

C (K) e com aquecimento a 350° C (K350) e 550° C (K550) dos horizontes Ap, BA, Bt1 e Bt2 do perfil PA44. C – caulinita, An

– anatásio e Gb – Gibbsita.



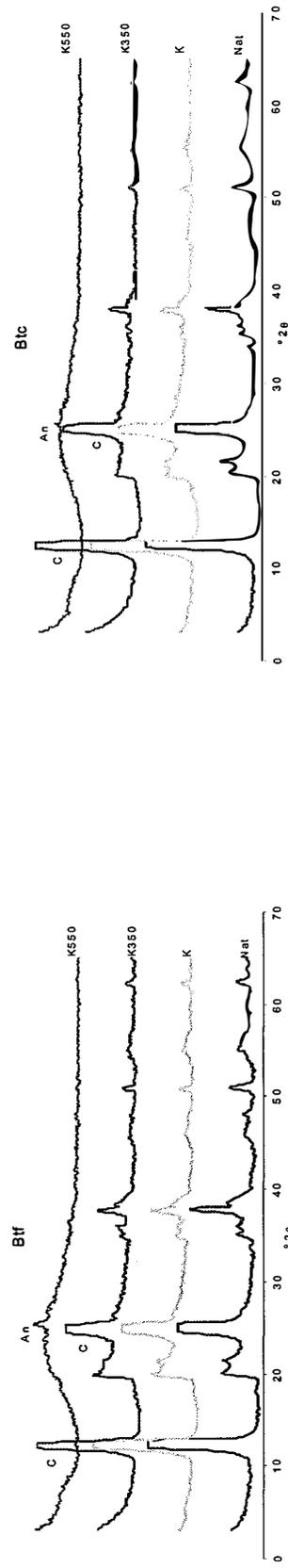
Difratogramas de raios-x da fração argila em condição natural (Nat), saturada com potássio em temperatura ambiente de 22° C (K) e com aquecimento a 350° C (K350) e 550° C (K550) dos horizontes Btf1 e Btf2 do perfil PA4. C – caulinita, An – anatásio e Gb – Gibbsita.



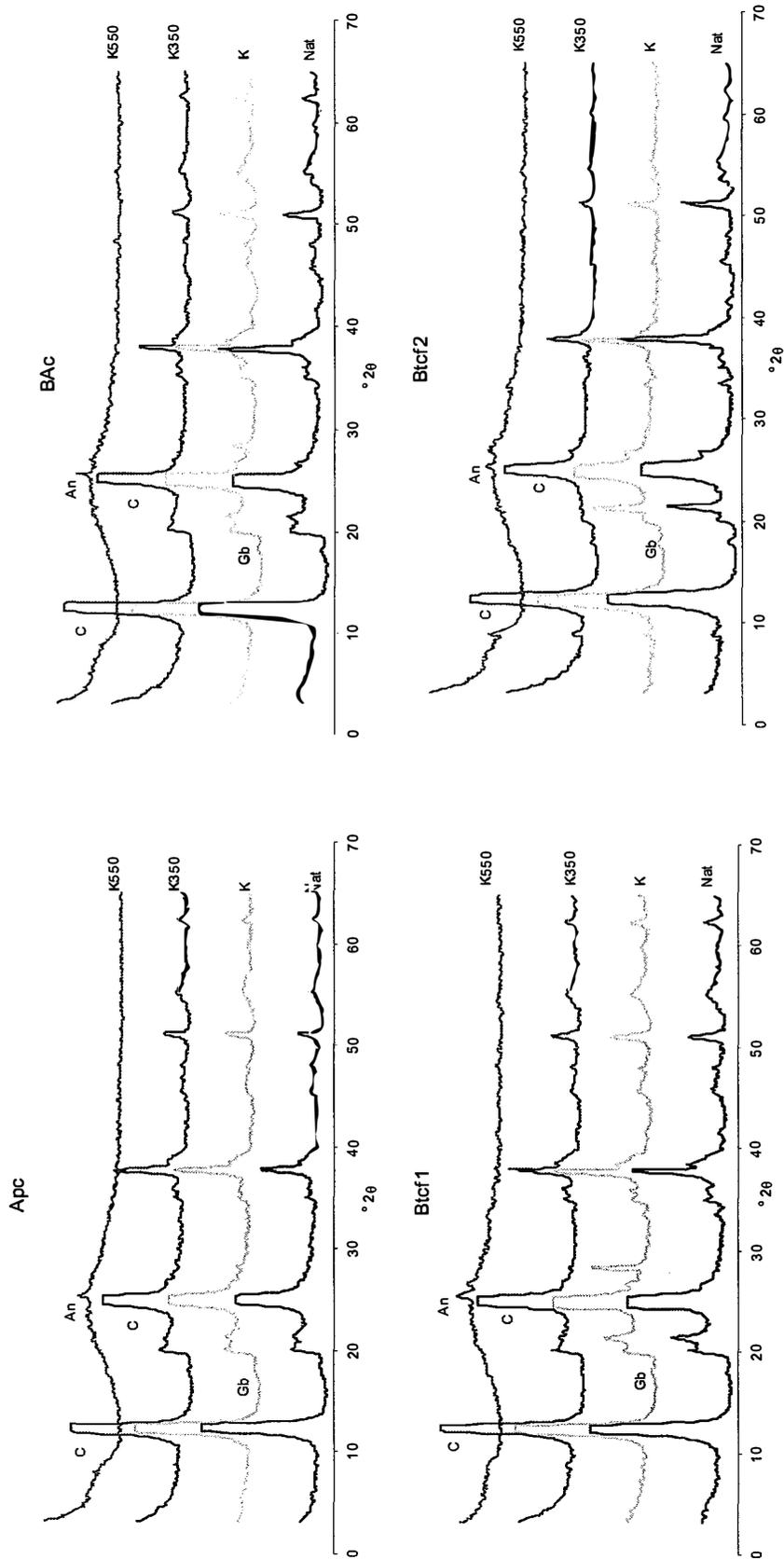
Difratogramas de raios-x da fração argila em condição natural (Nat), saturada com potássio em temperatura ambiente de 22°

C (K) e com aquecimento a 350° C (K350) e 550° C (K550) dos horizontes Ap, BA, Bt1 e Bt2 do perfil PAD5. C – caulinita, An

– anatásio e Gb – Gibbsita.



Difratogramas de raios-x da fração argila em condição natural (Nat), saturada com potássio em temperatura ambiente de 22° C (K) e com aquecimento a 350° C (K350) e 550° C (K550) dos horizontes Btf e Btc do perfil PAd5. C – caulinita e An – anatásio.



Difratogramas de raios-x da fração argila em condição natural (Nat), saturada com potássio em temperatura ambiente de 22° C (K) e com aquecimento a 350° C (K350) e 550° C (K550) dos horizontes Apc, BAc, Btcf1 e Btcf2 do perfil FFcd. C – caulinita, An – anatásio e Gb – Gibbsita.